

# 金属材料 力学性能手册

刘鸣放 刘胜新 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





封面设计·电脑制作：姚毅

机械工业出版社现有金属材料工具书书目(部分)

书 号	书 名	作 者	定价/元
31501	中外钢铁牌号速查手册 (第3版)	李维钺	48.00
29275	中外有色金属及其合金牌号速查手册 (第2版)	李维钺	39.00
18590	中外钢铁材料力学性能速查手册	李维钺	32.00
21277	中外有色金属及合金力学性能速查手册	李维钺	35.00
26507	中外金属材料牌号速查手册	李维钺	29.80
24367	中外不锈钢和耐热钢速查手册	李维钺	38.00
27620	钢铁材料速查手册	孙玉福	48.00
27406	有色金属材料速查手册	刘胜新	48.00
25050	袖珍世界钢号手册 (第4版)	林慧国	218.00
20922	实用钢铁材料手册 (第2版)	曾正明	82.00
22415	实用有色金属材料手册 (第2版)	曾正明	78.00
09104	五金速查手册 (第2版)	虞莲莲	28.00
09425	实用建筑五金手册	施 龚	106.00
04497	五金手册 (第2版)	李维荣	89.00
30459	新编五金手册	陈 永 潘继民	66.00
30122	新编钢铁材料手册	刘胜新	98.00
30832	新编有色金属材料手册	孙玉福	106.00
31300	机械工程材料手册——金属材料 (第7版)	曾正明	198.00

上架指导：工业技术/材料工程/金属材料

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037  
电话服务 网络服务  
社服务中心：(010)88361066 门户网：<http://www.cmpbook.com>  
销售一部：(010)68326294 教材网：<http://www.cmpedu.com>  
销售二部：(010)88379649  
读者服务部：(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

定价：72.00元





# 金属材料力学性能手册

主 编	刘鸣放	刘胜新			
副主编	苗晋琦	邵 冰			
参 编	陈 永	李 瑞	乔晓燕	赵 旭	李 莎
	严咏志	李立凤	王铁骊	吴珊珊	张素红
	李怀武	宋月鹏	高见峰	张金凤	高 玉
	孟 迪	鞠文彬	蒋佳国	吴振远	夏 静
	李 威	向 嵩	柳洪洁	金增亮	王志刚
	陈慧敏	李立里	魏晓龙	李 浩	侯晓丽
	陈 伟	李 静	靳先芳	徐丽娟	肖树龙
	徐 锟	潘继民	翟 震	王金荣	毛 磊
主 审	孙玉福				

机械工业出版社





本书全面系统地介绍了金属材料的各种力学性能测试方法,并归纳出了常用金属材料力学性能数据。其内容包括:金属材料力学性能相关知识,金属材料的拉伸性能、硬度、冲击性能、扭转性能、压缩性能、弯曲性能、剪切性能、断裂韧性、高温长时性能、疲劳性能的测试方法,以及铸铁和铸钢、工具钢、结构钢、不锈钢及耐热钢、高温合金和耐蚀合金、铝及铝合金、镁及镁合金、铜及铜合金、锌及其合金、钛及其合金、镍及其合金的常用力学性能数据。本书内容系统全面,叙述详尽清晰,数据齐全可靠,查阅方便快捷,具有实用性、综合性、先进性、可靠性。

本书可供从事工程设计、材料研究、质量检测、材料营销等技术工作的技术人员参考,也可作为高等院校及职业培训学校相关专业的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属材料力学性能手册/刘鸣放,刘胜新主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 1  
ISBN 978-7-111-32306-8

I. ①金… II. ①刘… ②刘… III. ①金属材料-材料力学性质-技术手册 IV. ①TG14-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 205231 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华

版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧 姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 39.25 印张 · 786 千

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-32306-8

定价:72.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379734

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版



# 前 言

金属材料广泛应用于工业生产各领域，是工业生产和生活中必不可少的物质基础，对现代科学技术发展和国民经济建设有重要作用。金属材料的力学性能是确保产品安全和使用寿命的最主要依据，在材料选择的合理性、材料应用的优化性等方面发挥着越来越大的作用。

金属材料力学性能的测试方法是工程技术人员必备的基础知识，常用金属材料的力学性能数据是工程技术人员经常查阅的技术数据。为了帮助读者掌握金属材料各种力学性能的测试方法，并能快速、准确地查阅常用金属材料的各种力学性能数据，从而为工程实践中的生产、设计、材料选用及选购提供科学依据，我们编写了这本工具书。

本书首先全面系统地介绍了金属材料各种力学性能的试验原理、试样的制备、试验仪器设备、试验步骤、操作技巧以及试验数据处理的方法，然后从各类标准中归纳出了常用金属材料的力学性能数据。全书内容包括金属材料力学性能相关知识、金属材料的拉伸性能、金属材料的硬度、金属材料的冲击性能、金属材料的扭转性能、金属材料的压缩性能、金属材料的弯曲性能、金属材料的剪切性能、金属材料的断裂韧性、金属材料的高温长时性能、金属材料的疲劳性能、铸铁和铸钢的力学性能、工具钢的力学性能、结构钢的力学性能、不锈钢及耐热钢的力学性能、高温合金和耐蚀合金的力学性能、铝及铝合金的力学性能、镁及镁合金的力学性能、铜及铜合金的力学性能，以及锌、钛、镍及其合金的力学性能，共20章。本书内容系统全面，叙述详尽清晰，数据齐全可靠，查阅方便快捷，具有实用性、综合性、先进性、可靠性。

本书可供从事工程设计、材料研究、质量检测、材料营销等工作的技术人员参考，也可作为高等院校及职业培训学校相关专业的参考书。

本书由刘鸣放、刘胜新任主编，苗晋琦、邵冰任副主编，参加编写的有陈永、李瑞、乔晓燕、赵旭、李莎、严咏志、李立凤、王铁骊、吴珊珊、张素红、李怀武、宋月鹏、高见峰、张金凤、高玉、孟迪、鞠文彬、蒋佳国、吴振远、夏静、李威、向嵩、柳洪洁、金增亮、王志刚、陈慧敏、李立里、魏晓龙、李浩、侯晓丽、陈伟、李静、靳先芳、徐丽娟、肖树龙、徐锬、潘继民、翟震、王金荣、毛磊。孙玉福教授对全书进行了详细审阅。



在本书编写过程中，参考了国内外同行的大量文献资料，谨向有关人员表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，错误和纰漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

新  
知  
识  
PDG



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 金属材料力学性能相关知识</b>	1
1.1 金属材料力学性能与工程应用	1
1.2 力学性能试验的试样制备	1
1.2.1 力学性能试验的试样相关术语	1
1.2.2 试料的状态	2
1.2.3 试样类型	2
1.2.4 样坯切取的原则和规定	3
1.2.5 取样方法	4
1.3 数值修约规则	19
1.3.1 术语和定义	19
1.3.2 数值修约规则	19
1.3.3 极限数值的表示和判定	21
1.4 试验数据的处理和误差分析	24
1.4.1 误差的定义和分类	24
1.4.2 直接测定量的误差表示法	26
1.4.3 力学性能试验数据处理举例	27
<b>第 2 章 金属材料的拉伸性能</b>	31
2.1 拉伸性能相关知识	31
2.1.1 拉伸性能及拉伸试验的定义	31
2.1.2 拉伸试验常用术语	31
2.2 拉伸试样的制备	34
2.2.1 试样的一般要求	34
2.2.2 厚度在 0.1 ~ <3mm 范围内的薄板和薄带使用的试样	35
2.2.3 厚度 $\geq 3\text{mm}$ 的板材和扁材及直径或厚度 $\geq 4\text{mm}$ 的线材、棒材和 型材使用的试样	36
2.2.4 直径或厚度 $< 4\text{mm}$ 的线材、棒材和型材使用的试样	38
2.2.5 管材使用的试样	39
2.2.6 焊接接头使用的试样	40
2.2.7 焊缝及熔敷金属使用的试样	43
2.2.8 低温拉伸试样	44
2.3 拉伸试验机及引伸计	46
2.3.1 电子万能试验机的结构原理	46

2.3.2	试验机的技术要求 .....	48
2.3.3	引伸计的结构原理及选用 .....	48
2.4	试验要求 .....	49
2.4.1	原始标距的标记 .....	49
2.4.2	原始横截面积的测定 .....	49
2.4.3	试验设备的准确度 .....	50
2.4.4	试验速率 .....	50
2.4.5	高温拉伸时的加热 .....	51
2.4.6	低温拉伸时的冷却 .....	52
2.5	拉伸性能的测定 .....	52
2.5.1	断后伸长率和断裂总伸长率的测定 .....	52
2.5.2	最大力总伸长率和最大力非比例伸长率的测定 .....	62
2.5.3	屈服点延伸率的测定 .....	63
2.5.4	上屈服强度和下屈服强度的测定 .....	64
2.5.5	规定非比例延伸强度的测定 .....	64
2.5.6	规定总延伸强度的测定 .....	66
2.5.7	抗拉强度的测定 .....	66
2.5.8	断面收缩率的测定 .....	66
2.5.9	拉伸杨氏模量的测定 .....	67
2.5.10	弦线模量的测定 .....	67
2.5.11	切线模量的测定 .....	68
2.5.12	电阻应变计测定弹性模量 .....	69
2.5.13	泊松比的测定 .....	70
2.5.14	薄板和薄带拉伸应变硬化指数的测定 .....	70
2.6	拉伸试样的宏观断口形态 .....	73
第3章	金属材料的硬度 .....	75
3.1	硬度相关知识 .....	75
3.1.1	硬度及硬度试验的定义 .....	75
3.1.2	硬度试验常用术语 .....	76
3.2	硬度试样的制备 .....	76
3.2.1	试样的一般要求 .....	76
3.2.2	洛氏硬度试样 .....	76
3.2.3	布氏硬度试样 .....	78
3.2.4	维氏硬度试样 .....	79
3.2.5	努氏硬度试样 .....	79
3.2.6	肖氏硬度试样 .....	79
3.2.7	里氏硬度试样 .....	79
3.3	硬度计 .....	81



3.3.1 洛氏硬度计 .....	81
3.3.2 布氏硬度计 .....	82
3.3.3 维氏硬度计和努氏硬度计 .....	82
3.3.4 肖氏硬度计 .....	83
3.3.5 里氏硬度计 .....	83
3.4 试验要求 .....	84
3.5 硬度的测定 .....	84
3.5.1 洛氏硬度的测定 .....	84
3.5.2 布氏硬度的测定 .....	89
3.5.3 维氏硬度的测定 .....	106
3.5.4 努氏硬度的测定 .....	114
3.5.5 肖氏硬度的测定 .....	147
3.5.6 里氏硬度的测定 .....	147
3.5.7 焊接接头硬度的测定 .....	149
3.5.8 钢铁热处理零件硬度测试通则 .....	155
3.6 各种硬度及强度之间的转换 .....	157
3.6.1 各种硬度间的换算关系 .....	157
3.6.2 钢铁材料硬度与强度的换算关系 .....	158
3.6.3 有色金属材料硬度与强度的换算关系 .....	162
<b>第4章 金属材料的冲击性能 .....</b>	<b>163</b>
4.1 冲击性能相关知识 .....	163
4.1.1 冲击性能及冲击试验的定义 .....	163
4.1.2 冲击试验常用术语 .....	163
4.2 冲击试样的制备 .....	166
4.2.1 试样的一般要求 .....	166
4.2.2 夏比 V 形缺口试样 .....	166
4.2.3 夏比 U 形缺口试样 .....	167
4.2.4 非标准试样 .....	167
4.2.5 焊接接头冲击试验用试样 .....	168
4.3 冲击试验机 .....	170
4.3.1 摆锤冲击试验机 .....	170
4.3.2 低温冲击试验机 .....	170
4.3.3 高温冲击试验机 .....	172
4.4 试验要求 .....	172
4.4.1 一般要求 .....	172
4.4.2 试验温度 .....	172
4.4.3 试样的转移 .....	173
4.5 冲击性能的测定 .....	174

4.5.1 夏比摆锤冲击法 .....	174
4.5.2 夏比 V 形缺口摆锤冲击试验仪器化法 .....	174
4.6 冲击断口的测定 .....	177
4.6.1 纤维断面率的测定 .....	177
4.6.2 侧膨胀值的测定 .....	179
<b>第 5 章 金属材料的扭转性能 .....</b>	<b>181</b>
5.1 扭转性能相关知识 .....	181
5.1.1 扭转性能及扭转试验的定义 .....	181
5.1.2 扭转试验常用术语 .....	181
5.2 扭转试样的制备 .....	182
5.2.1 圆柱形试样 .....	182
5.2.2 管形试样 .....	182
5.2.3 小规格金属线材扭转试样 .....	182
5.2.4 大规格金属线材扭转试样 .....	183
5.2.5 试样尺寸的测量 .....	183
5.3 扭转试验机和扭转计 .....	184
5.3.1 扭转试验机 .....	184
5.3.2 扭转计 .....	185
5.4 试验要求 .....	185
5.5 扭转性能的测定 .....	185
5.5.1 试验原理 .....	185
5.5.2 剪切模量的测定 .....	186
5.5.3 规定非比例扭转强度的测定 .....	187
5.5.4 上屈服强度和下屈服强度的测定 .....	190
5.5.5 抗扭强度的测定 .....	190
5.5.6 最大非比例切应变的测定 .....	191
5.5.7 金属线材扭转性能的测定 .....	191
5.5.8 测得性能数值的修约 .....	191
5.6 扭转试样的断口形貌及特征 .....	192
<b>第 6 章 金属材料的压缩性能 .....</b>	<b>193</b>
6.1 压缩性能相关知识 .....	193
6.1.1 压缩性能及压缩试验的定义 .....	193
6.1.2 压缩试验常用术语 .....	193
6.2 压缩试样的制备 .....	194
6.2.1 试样的一般要求 .....	194
6.2.2 侧向无约束试样 .....	195
6.2.3 板状试样 .....	196
6.2.4 试样尺寸测量 .....	197

6.3 压缩试验机及其附属装置 .....	197
6.3.1 压缩试验机 .....	197
6.3.2 附属装置 .....	197
6.4 试验要求 .....	199
6.5 压缩性能的测定 .....	200
6.5.1 板状试样夹紧力的选择 .....	200
6.5.2 板状试样实际压缩力的测定 .....	200
6.5.3 规定非比例压缩强度的测定 .....	201
6.5.4 规定总压缩强度的测定 .....	201
6.5.5 上压缩屈服强度和下压缩屈服强度的测定 .....	202
6.5.6 抗压强度的测定 .....	204
6.5.7 压缩弹性模量的测定 .....	204
6.5.8 压缩性能测定结果数值的修约 .....	204
6.6 压缩试样的破坏形式 .....	205
<b>第7章 金属材料的弯曲性能 .....</b>	<b>206</b>
7.1 弯曲性能相关知识 .....	206
7.1.1 弯曲性能和弯曲试验的定义 .....	206
7.1.2 弯曲试验常用术语 .....	206
7.2 弯曲试样的制备 .....	207
7.2.1 试样的一般要求 .....	207
7.2.2 圆形横截面和矩形横截面试样 .....	208
7.2.3 金属管试样 .....	209
7.2.4 焊接接头试样 .....	209
7.2.5 金属线材反复弯曲试样 .....	213
7.2.6 试样尺寸的测量 .....	213
7.3 弯曲试验设备 .....	214
7.3.1 试验机 .....	214
7.3.2 三点弯曲试验装置 .....	214
7.3.3 四点弯曲试验装置 .....	214
7.3.4 薄板试样用三点弯曲试验装置 .....	215
7.3.5 薄板试样用四点弯曲试验装置 .....	216
7.3.6 挠度计 .....	216
7.3.7 金属管弯曲试验设备 .....	217
7.3.8 V形模具式弯曲装置 .....	217
7.3.9 台虎钳式弯曲装置 .....	217
7.3.10 翻板式弯曲装置 .....	217
7.3.11 金属线材反复弯曲试验设备 .....	218
7.3.12 热双金属弯曲试验装置 .....	218



7.4 试验要求 .....	221
7.5 弯曲性能的测定 .....	222
7.5.1 弯曲弹性模量的测定 .....	222
7.5.2 规定非比例弯曲应力的测定 .....	223
7.5.3 规定残余弯曲应力的测定 .....	224
7.5.4 抗弯强度的测定 .....	225
7.5.5 断裂挠度的测定 .....	226
7.5.6 弯曲断裂能量的测定 .....	226
7.5.7 测试结果数值的修约 .....	226
7.5.8 金属管弯曲性能的测定 .....	227
7.5.9 金属线材反复弯曲性能测定 .....	227
7.5.10 焊接接头弯曲性能的测定 .....	228
<b>第8章 金属材料的剪切性能 .....</b>	<b>233</b>
8.1 剪切性能相关知识 .....	233
8.1.1 剪切性能和剪切试验的定义 .....	233
8.1.2 剪切试验常用术语 .....	234
8.2 剪切试样的制备 .....	234
8.2.1 一般要求 .....	234
8.2.2 线材试样 .....	234
8.2.3 铆钉试样 .....	235
8.3 剪切试验设备 .....	235
8.3.1 线材和铆钉剪切试验设备 .....	235
8.3.2 销剪切试验设备 .....	239
8.4 试验要求 .....	239
8.4.1 线材及铆钉剪切试验要求 .....	239
8.4.2 销剪切试验要求 .....	239
8.5 剪切性能的测定 .....	240
<b>第9章 金属材料的断裂韧性 .....</b>	<b>241</b>
9.1 断裂韧性相关知识 .....	241
9.1.1 断裂韧性及断裂韧性试验的定义 .....	241
9.1.2 断裂韧性试验常用术语 .....	241
9.2 断裂韧性试样的制备 .....	243
9.2.1 平面应变裂纹止裂断裂韧性试样 .....	243
9.2.2 平面应变断裂韧性试样 .....	244
9.2.3 表面裂纹拉伸断裂韧性试样 .....	247
9.3 断裂韧性试验设备 .....	248
9.3.1 平面应变裂纹止裂断裂韧性试验装置 .....	248
9.3.2 表面裂纹拉伸断裂韧性试验装置 .....	250

9.3.3 其他断裂韧性试验装置 .....	251
9.4 试验要求 .....	253
9.5 断裂韧性的测定 .....	254
9.5.1 平面应变裂纹止裂断裂韧性的测定 .....	254
9.5.2 平面应变断裂韧性的测定 .....	259
9.5.3 表面裂纹拉伸断裂韧性的测定 .....	263
<b>第10章 金属材料高温长时性能 .....</b>	<b>267</b>
10.1 高温长时性能相关知识 .....	267
10.2 金属拉伸蠕变及持久试验 .....	268
10.2.1 拉伸蠕变及持久试验简介及相关术语 .....	268
10.2.2 拉伸蠕变及持久试样的制备 .....	270
10.2.3 拉伸蠕变及持久试验设备 .....	273
10.2.4 试验要求 .....	274
10.2.5 蠕变极限的测定 .....	275
10.2.6 持久强度极限的测定 .....	277
10.3 金属应力松弛试验 .....	278
10.3.1 应力松弛试验简介及相关术语 .....	278
10.3.2 应力松弛试样的制备 .....	280
10.3.3 应力松弛试验设备 .....	282
10.3.4 试验要求 .....	282
10.3.5 高温拉伸应力松弛的测定 .....	283
10.3.6 高温弯曲应力松弛的测定 .....	283
10.3.7 松弛曲线的建立与外推 .....	284
<b>第11章 金属材料的疲劳性能 .....</b>	<b>285</b>
11.1 疲劳性能相关知识 .....	285
11.2 扭应力疲劳试验 .....	285
11.2.1 试验原理 .....	285
11.2.2 试样 .....	286
11.2.3 试验设备及试验条件 .....	288
11.2.4 试验步骤 .....	288
11.2.5 扭转疲劳性能的测定 .....	288
11.2.6 试验结果的处理 .....	289
11.3 滚动接触疲劳试验 .....	290
11.3.1 试验术语 .....	290
11.3.2 试验原理 .....	290
11.3.3 试样和陪试件 .....	290
11.3.4 试验设备及试验条件 .....	294
11.3.5 试验步骤 .....	295

11.3.6	$N$ 次循环的中值接触疲劳强度的测定	295
11.3.7	试验结果处理	296
11.4	旋转弯曲疲劳试验	300
11.4.1	试验术语	300
11.4.2	试验原理	300
11.4.3	试样	300
11.4.4	试验设备及试验条件	306
11.4.5	试验步骤	307
11.4.6	试验结果的处理	308
11.5	疲劳裂纹扩展速率试验	309
11.5.1	试验术语	309
11.5.2	试样	311
11.5.3	试验设备及试验条件	314
11.5.4	试验步骤	315
11.5.5	试验结果的处理	316
11.6	轴向等辐低循环疲劳试验	317
11.6.1	试验术语	317
11.6.2	试样	320
11.6.3	试验设备及试验条件	321
11.6.4	试验步骤	323
11.6.5	试验结果的处理	324
11.7	腐蚀疲劳循环失效试验	325
11.7.1	试验术语	325
11.7.2	试验原理	325
11.7.3	试样	326
11.7.4	试验装置及试验条件	327
11.7.5	试验步骤	327
第12章	铸铁和铸钢的力学性能	329
12.1	铸铁的力学性能	329
12.1.1	灰铸铁的力学性能	329
12.1.2	白口铸铁的力学性能	331
12.1.3	蠕墨铸铁的力学性能	331
12.1.4	球墨铸铁的力学性能	332
12.1.5	可锻铸铁的力学性能	336
12.1.6	耐热耐蚀铸铁的力学性能	337
12.1.7	耐磨铸铁的力学性能	338
12.2	铸钢的力学性能	340
12.3	不锈钢铸件的力学性能	344



<b>第 13 章 工具钢的力学性能</b> .....	346
13.1 碳素工具钢的力学性能 .....	346
13.1.1 普通碳素工具钢的硬度 .....	346
13.1.2 大型锻件用碳素工具钢的硬度 .....	346
13.1.3 手表用碳素工具钢冷轧钢带的力学性能 .....	347
13.2 合金工具钢的力学性能 .....	347
13.2.1 合金工具钢的力学性能 .....	347
13.2.2 高速工具钢的硬度 .....	350
13.2.3 塑料模具用钢的力学性能 .....	351
13.2.4 弹簧钢和工具钢冷轧钢带的力学性能 .....	352
<b>第 14 章 结构钢的力学性能</b> .....	353
14.1 钢种的力学性能 .....	353
14.1.1 碳素结构钢的力学性能 .....	353
14.1.2 合金结构钢的力学性能 .....	354
14.1.3 易切削结构钢的力学性能 .....	361
14.2 专用结构钢的力学性能 .....	364
14.2.1 冷拉、冷镦和冷挤结构钢的力学性能 .....	364
14.2.2 汽轮机叶片用结构钢的力学性能 .....	367
14.2.3 矿用高强度圆环链用钢的力学性能 .....	369
14.2.4 重型机械用弹簧钢的力学性能 .....	370
14.2.5 桥梁及船体用结构钢的力学性能 .....	370
14.2.6 铁塔用热轧角钢的力学性能 .....	373
14.2.7 铁路车辆用结构钢的力学性能 .....	373
14.2.8 轴承钢的力学性能 .....	374
14.2.9 弹簧钢的力学性能 .....	375
14.3 钢板及钢带的力学性能 .....	376
14.3.1 石油天然气输送用钢板及钢带的力学性能 .....	376
14.3.2 碳素结构钢钢板及钢带的力学性能 .....	378
14.3.3 合金结构钢薄钢板的力学性能 .....	380
14.3.4 压力容器用钢板的力学性能 .....	381
14.3.5 冷轧钢板及钢带的力学性能 .....	382
14.3.6 汽车用钢板和钢带的力学性能 .....	385
14.3.7 连续热镀合金镀层钢板及钢带的力学性能 .....	386
14.3.8 特殊结构钢板及钢带的力学性能 .....	391
14.4 钢管的力学性能 .....	397
14.4.1 压力设备用钢管的力学性能 .....	391
14.4.2 焊接钢管的力学性能 .....	401
14.4.3 无缝钢管的力学性能 .....	402

14.4.4	异型钢管的力学性能 .....	407
14.4.5	合金钢钢管的力学性能 .....	408
14.4.6	优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢管的力学性能 .....	410
14.5	盘条和钢筋的力学性能 .....	412
14.5.1	盘条的力学性能 .....	412
14.5.2	钢筋的力学性能 .....	413
14.6	钢棒和钢丝的力学性能 .....	414
14.6.1	钢棒的力学性能 .....	414
14.6.2	钢丝的力学性能 .....	418
<b>第 15 章</b>	<b>不锈钢及耐热钢的力学性能 .....</b>	<b>422</b>
15.1	不锈钢的力学性能 .....	422
15.1.1	不锈钢钢板和钢带的力学性能 .....	422
15.1.2	不锈钢钢管的力学性能 .....	430
15.1.3	不锈钢钢丝的力学性能 .....	437
15.1.4	不锈钢钢棒的力学性能 .....	440
15.1.5	特种不锈钢的力学性能 .....	445
15.2	耐热钢的力学性能 .....	447
15.2.1	耐热钢板和钢带的力学性能 .....	447
15.2.2	耐热钢棒的力学性能 .....	452
<b>第 16 章</b>	<b>高温合金和耐蚀合金的力学性能 .....</b>	<b>456</b>
16.1	高温合金的力学性能 .....	456
16.1.1	高温合金板材的力学性能 .....	456
16.1.2	高温合金管材的力学性能 .....	458
16.1.3	高温合金棒材和丝材的力学性能 .....	459
16.1.4	高温合金环件毛坯的力学性能 .....	461
16.1.5	高温合金锻制圆饼的力学性能 .....	463
16.1.6	铸造高温合金母合金的力学性能 .....	464
16.2	耐蚀合金的力学性能 .....	467
16.2.1	耐蚀合金板带材的力学性能 .....	467
16.2.2	耐蚀合金棒材的力学性能 .....	468
16.2.3	耐蚀合金锻件的力学性能 .....	469
<b>第 17 章</b>	<b>铝及铝合金的力学性能 .....</b>	<b>470</b>
17.1	铝及铝合金板带材的力学性能 .....	470
17.1.1	一般工业用铝及铝合金板带材的力学性能 .....	470
17.1.2	印刷版基用铝板带的力学性能 .....	498
17.1.3	百叶窗用铝合金带材的力学性能 .....	498
17.1.4	易拉罐罐体用铝合金带材的力学性能 .....	498
17.1.5	表盘及装饰用纯铝板的力学性能 .....	498

17.1.6	钎焊用铝合金复合板的力学性能 .....	502
17.1.7	瓶盖用铝合金板带材的力学性能 .....	503
17.1.8	铁道货车用铝合金板材的力学性能 .....	504
17.1.9	铝及铝合金花纹板的力学性能 .....	504
17.1.10	铝及铝合金彩色涂层板带材的力学性能 .....	505
17.1.11	铝及铝合金铸轧带材的力学性能 .....	512
17.1.12	铝幕墙板用板基的力学性能 .....	513
17.2	铝及铝合金箔材的力学性能 .....	514
17.2.1	半刚性容器用铝及铝合金箔的力学性能 .....	514
17.2.2	泡罩包装用铝及铝合金箔的力学性能 .....	515
17.2.3	空调器散热片用素铝箔的力学性能 .....	516
17.2.4	啤酒标用铝合金箔的力学性能 .....	517
17.2.5	铝及铝合金箔的力学性能 .....	518
17.2.6	电缆用铝箔的力学性能 .....	520
17.3	铝及铝合金管材的力学性能 .....	521
17.3.1	SB211 壳体用 919 铝合金厚壁挤压管的力学性能 .....	521
17.3.2	铝及铝合金连续挤压管的力学性能 .....	521
17.3.3	铝及铝合金拉(轧)制无缝管材的力学性能 .....	521
17.3.4	铝及铝合金热挤压无缝圆管的力学性能 .....	524
17.3.5	铝及铝合金热挤压有缝管材的室温纵向力学性能 .....	525
17.3.6	凿岩机用铝合金管的力学性能 .....	527
17.4	铝及铝合金棒材的力学性能 .....	527
17.4.1	一般工业用铝及铝合金棒材的室温纵向力学性能 .....	527
17.4.2	铝及铝合金挤压扁棒的力学性能 .....	528
17.4.3	铝及铝合金挤压棒的力学性能 .....	530
17.4.4	高强度铝合金挤压棒的力学性能 .....	531
17.4.5	煤矿支柱用铝合金棒材的力学性能 .....	531
17.4.6	电工圆铝杆的力学性能 .....	531
17.5	铝及铝合金线材和丝材的力学性能 .....	532
17.5.1	半导体器件键合用铝丝的力学性能 .....	532
17.5.2	电工用铝及铝合金扁线的力学性能 .....	532
17.5.3	电工圆铝线的力学性能 .....	533
17.5.4	电缆屏蔽用铝镁合金线的力学性能 .....	533
17.5.5	铝及铝合金拉制圆线材的力学性能 .....	534
17.5.6	铝钛合金线的力学性能 .....	535
17.6	铝及铝合金锻件的力学性能 .....	535
17.6.1	SB211 壳体用 919 铝合金模锻件的力学性能 .....	535
17.6.2	一般工业用铝及铝合金模锻件的力学性能 .....	536



17.7 铝及铝合金铸件的力学性能 .....	538
17.7.1 冶金设备铝合金铸件的力学性能 .....	538
17.7.2 烟草机械用铝合金铸件的力学性能 .....	539
17.7.3 铸造铝合金的力学性能 .....	540
17.8 铝及铝合金导体的力学性能 .....	543
<b>第18章 镁及镁合金的力学性能</b> .....	544
18.1 镁及镁合金板材的力学性能 .....	544
18.2 镁合金热挤压管材的力学性能 .....	545
18.3 镁合金棒材的力学性能 .....	545
18.3.1 镁合金挤压棒的力学性能 .....	545
18.3.2 镁合金热挤制矩形棒的力学性能 .....	546
18.4 镁合金热挤压型材的力学性能 .....	546
18.5 镁及镁合金铸件的力学性能 .....	547
18.5.1 镁合金铸件的力学性能 .....	547
18.5.2 便携式工具用镁合金压铸件的力学性能 .....	548
<b>19章 铜及铜合金的力学性能</b> .....	549
9.1 铜及铜合金板带材的力学性能 .....	549
19.1.1 无氧铜板带材的力学性能 .....	549
19.1.2 电子元器件用铍青铜板带材的力学性能 .....	549
19.1.3 电子元器件用铍青铜板带材时效处理后的力学性能 .....	549
19.1.4 电缆用铜带的力学性能 .....	550
19.1.5 导电用铜板和条的力学性能 .....	550
19.1.6 连铸结晶器用铜板的力学性能 .....	550
19.1.7 变压器用铜带的力学性能 .....	551
19.1.8 铍青铜板带材的力学性能 .....	551
19.1.9 铜及铜合金板材的力学性能 .....	552
19.1.10 铜及铜合金带材的力学性能 .....	554
19.1.11 散热器水室和主片用黄铜带材的力学性能 .....	558
19.2 铜及铜合金箔材的力学性能 .....	558
19.2.1 电解铜箔的力学性能 .....	558
19.2.2 铜及铜合金箔材的力学性能 .....	558
19.2.3 散热器散热片专用纯铜及黄铜带箔材的力学性能 .....	559
19.3 铜及铜合金管材的力学性能 .....	559
19.3.1 卫生洁具用黄铜管的力学性能 .....	559
19.3.2 电缆用无缝铜管的力学性能 .....	560
19.3.3 压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 .....	560
19.3.4 导电用无缝圆形铜管的力学性能 .....	560
19.3.5 连铸圆坯结晶器铜管的力学性能 .....	560

19.3.6	海水淡化装置用铜合金无缝管的力学性能	561
19.3.7	换热器用铜及铜合金无缝翅片管的力学性能	561
19.3.8	普通级铜及铜合金毛细管的力学性能	562
19.3.9	纯铜管材的力学性能	562
19.3.10	黄铜管材及白铜管材的力学性能	563
19.3.11	拉杆天线套管的力学性能	564
19.3.12	磁控管用无氧铜管的力学性能	564
19.4	铜及铜合金棒材的力学性能	565
19.4.1	电子元器件用铍青铜棒材的力学性能	565
19.4.2	电极材料用铬锆青铜棒的力学性能	565
19.4.3	导电用铜棒的力学性能	566
19.4.4	钟表用铅黄铜棒与线的力学性能	566
19.4.5	热锻水暖管件用黄铜棒的力学性能	566
19.4.6	铍青铜棒的力学性能	567
19.4.7	铜及铜合金圆形棒、方形棒和六角形棒材的力学性能	567
19.4.8	铜及铜合金矩形棒材的力学性能	570
19.4.9	铅黄铜拉花棒的力学性能	570
19.5	铜及铜合金线材的力学性能	570
19.5.1	电力牵引用铜及铜合金双沟形接触线的力学性能	570
19.5.2	电子器件用镀锡铜线的力学性能	571
19.5.3	电工用铜扁线的力学性能	572
19.5.4	电工用铜线坯的力学性能	572
19.5.5	电工圆铜线的力学性能	572
19.5.6	铜及铜合金扁线材的力学性能	574
19.5.7	铍青铜线的力学性能	575
19.5.8	镀银软圆铜线的力学性能	575
19.6	铜及铜合金铸件的力学性能	576
19.6.1	铸造铜合金的力学性能	576
19.6.2	压铸铜合金的力学性能	578
19.7	引线框架用铜及铜合金的力学性能	578
<b>第20章</b>	<b>锌、钛、镍及其合金的力学性能</b>	<b>580</b>
20.1	铸造锌合金的力学性能	580
20.2	钛及钛合金的力学性能	580
20.2.1	板式换热器钛板的力学性能	580
20.2.2	钛及钛合金板材的力学性能	581
20.2.3	钛及钛合金板材的高温力学性能	582
20.2.4	钛及钛合金带、箔材的力学性能	583
20.2.5	工业流体用焊接钛及钛合金管的力学性能	584

20.2.6	钛及钛合金管材的力学性能 .....	584
20.2.7	换热器及冷凝器用钛及钛合金管材的力学性能 .....	584
20.2.8	钛及钛合金结构件经热处理后的力学性能 .....	584
20.2.9	外科植入物用钛及钛合金加工丝材的力学性能 .....	585
20.2.10	钛及钛合金棒材的力学性能 .....	585
20.2.11	钛及钛合金饼和环的力学性能 .....	586
20.3	镍及镍合金的力学性能 .....	587
20.3.1	镍及镍合金板材的力学性能 .....	587
20.3.2	镍及镍合金带材的力学性能 .....	587
20.3.3	压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 .....	588
20.3.4	镍及镍合金管材的力学性能 .....	588
20.3.5	镍及镍合金棒材的力学性能 .....	589
20.3.6	镍及镍合金焊条熔敷金属的力学性能 .....	589
20.3.7	镍及镍合金线的力学性能 .....	591
20.3.8	电池用泡沫镍的室温力学性能 .....	593
附录	.....	594
附录 A	金属材料力学性能测试标准代号及名称 .....	594
附录 B	金属材料力学性能试验相关符号及说明 .....	598
附录 C	拉伸性能指标名称和符号新旧对照 .....	607
参考文献	.....	608



# 第1章 金属材料力学性能相关知识

## 1.1 金属材料力学性能与工程应用

材料的力学性能是指材料在不同环境（如温度、介质、湿度）下，承受各种外加载荷（拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等）时所表现出的力学特征。近年来，材料的力学性能已逐渐形成一门新的学科。

材料力学性能是一门试验学科，它的基础就是对材料的各种力学性能指标进行测定，这就是力学性能试验。进行力学性能试验的目的如下：

（1）研究材料在给定条件下的力学性能变化规律 材料在内部因素和外部条件的作用下，其强度和变形的规律，需要通过试验来测定。掌握这种规律，便可应用于设计、选材以及研究工作中，为结构件和零部件的设计提供材料的力学性能数据。

（2）为材料的成分选择和热处理工艺的制订提供依据 根据材料制成的零部件的服役条件，确定考核材料性能的力学性能指标，然后以此为依据来调整材料的成分和选择热处理工艺，以便得到强度、塑性和韧性相配合的综合性能最佳的材料和工艺。

## 1.2 力学性能试验的试样制备

### 1.2.1 力学性能试验的试样相关术语

（1）试验单元 根据产品标准或合同的要求，以在抽样产品上所进行的试验为依据，一次接收或拒收产品的件数或吨数，称为试验单元，如图 1-1 所示。

（2）抽样产品 检验、试验时，在试验单元中抽取的部分（例如：一块板），称为抽样产品，如图 1-1 所示。

（3）试料 为了制备一个或几个试样，从抽样产品中切取足够量的材料，称为试料（在某些情况下，试料就是抽样产品），如图 1-1 所示。

（4）样坯 为了制备试样，经过机械处理或所需热处理后的试料，称为样坯，如图 1-1 所示。

（5）试样 经机加工或未经机加工后，具有合格尺寸且满足试验要求的状态



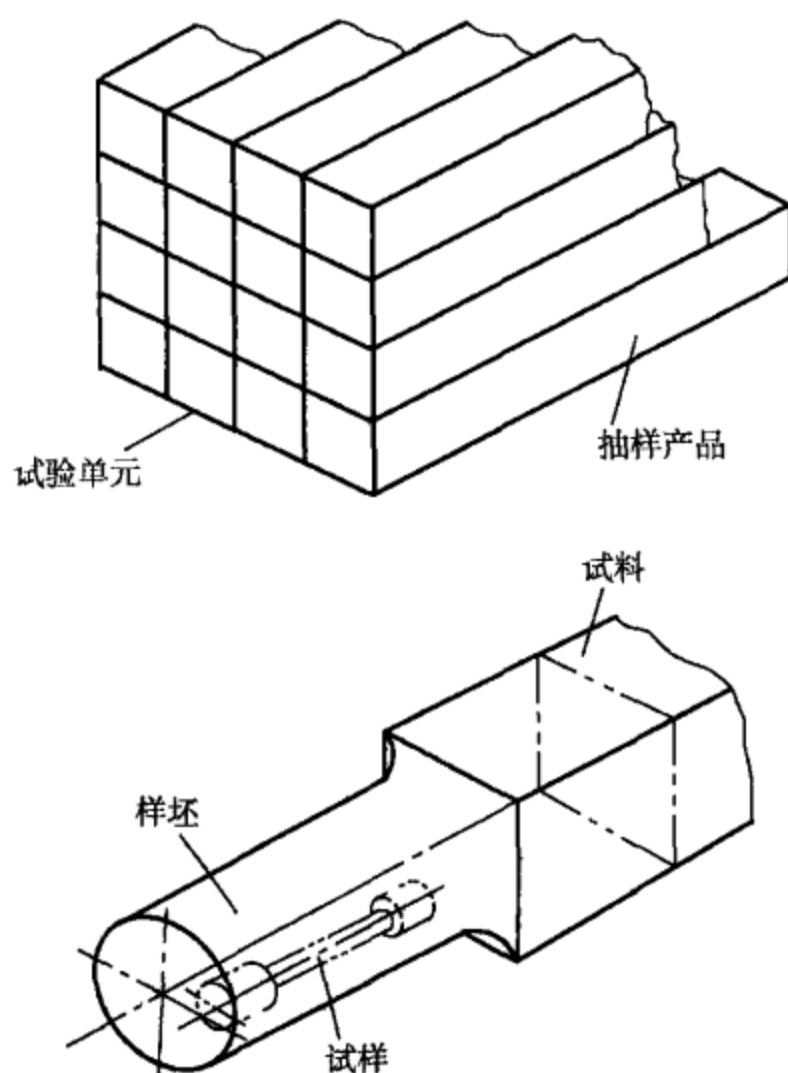


图 1-1 试验单元、抽样产品、试料、样坯及试样

的样坯，称为试样（在某些状态下，试样可以是试料，也可以是样坯），如图 1-1 所示。

### 1.2.2 试料的状态

取样的状态分为交货状态和标准状态。

#### 1. 交货状态

在交货状态下取样时，可从以下两种条件中选择：

- 1) 产品成形和热处理完成之后取样。
- 2) 如在热处理之前取样，试料应在与交货产品相同的条件下进行热处理。当需要矫直试料时，应在冷状态下进行。

#### 2. 标准状态

在标准状态下取样时，应按产品标准或订货单规定的生产阶段取样。如必须对试料矫直，可在热处理之前进行热加工或冷加工，热加工的温度应低于最终热处理温度。

### 1.2.3 试样类型

- 1) 从原材料上直接切取样坯，然后加工成标准规定的标准试样。例如型材、

棒材、板材、管材和线材等，就是根据国家标准（或其他相关标准），在一定的部位取出一定尺寸的样坯，加工成所需的拉伸、弯曲和冲击等试验所需的试样。

2) 以产品（结构或零部件）的一定部位（一般是最薄弱、最危险的部位）切取样坯，加工成一定尺寸的试样，进行相应的力学性能试验。它与试验应力分析相配合，可进一步校正设计计算的正确性，也可检验产品热处理及加工工艺等是否符合预期的要求，在失效分析中具有重要作用。

3) 把零部件或结构作为样品，直接进行力学性能试验。例如弹簧、螺栓、齿轮、轴承、轴和连杆等。又如一台发动机、一辆汽车或一架飞机，都可作为一个试样，用来作静载、动载等各项试验，以便测定其强度和变形等力学性能。这种试验代价比较大，但其试验结果反映了材料、热处理、机加工和连接配合等综合的效果，因此具有代表性。

## 1.2.4 样坯切取的原则和规定

### 1. 样坯切取的原则

1) 取样部位要有代表性。对原材料而言，由于型材、棒材、板材、管材等各部位的性能不尽相同，因此应在特定的部位取样，才有代表性和可比性。对实际零部件而言，具有代表性的一般是最薄弱、最危险部位。代表性的另一含义是，切取何种试样样坯，应与零部件的服役条件相一致，否则就失去意义。

2) 样坯切取的部位、方向、尺寸和数值均应按有关标准、技术条件或技术协议进行。

### 2. 样坯切取的相关规定

按照 GB/T 2975—1998《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》的要求，样坯切取的规定如下：

1) 样坯应在外观及尺寸合格的钢材上切取。

2) 取样时，应对抽样产品、试料、样坯和试样作出标记，以保证始终能识别取样的位置及方向。

3) 切取样坯时应防止受热、加工硬化及变形而影响其力学及工艺性能。样坯的切取方法一般有火焰切割和冷剪两种。用火焰切割法切取样坯时，材料在火焰喷射下熔化，从而使样坯从整体中分离出来。在熔化区附近，材料所经受的局部高温将会引起材料性能的很大变化，因此从样坯切割线至试样边缘必须留有足够的余量，在试样加工时，把这一部分余量去掉，从而不影响试样的性能。这一余量的规定为：一般应不小于钢材的厚度或直径，但最小不得小于 20mm。对厚度或直径大于 60mm 的钢材，其切割余量可适当减小。用冷剪法切取样坯时，在冷剪边缘会产生塑性变形，厚度或直径越大，塑性变形的范围也越大，必须留下足够的剪裁余量，其规定如表 1-1 所示。

表 1-1 加工余量的规定

(单位: mm)

钢材的厚度或直径	加工余量	钢材的厚度或直径	加工余量
$\leq 4$	4	$> 20 \sim 35$	15
$> 4 \sim 10$	厚度或直径	$> 35$	20
$> 10 \sim 20$	10		

### 1.2.5 取样方法

#### 1. 型钢的取样

1) 在型钢腿部宽度方向切取样坯的位置按图 1-2 所示。

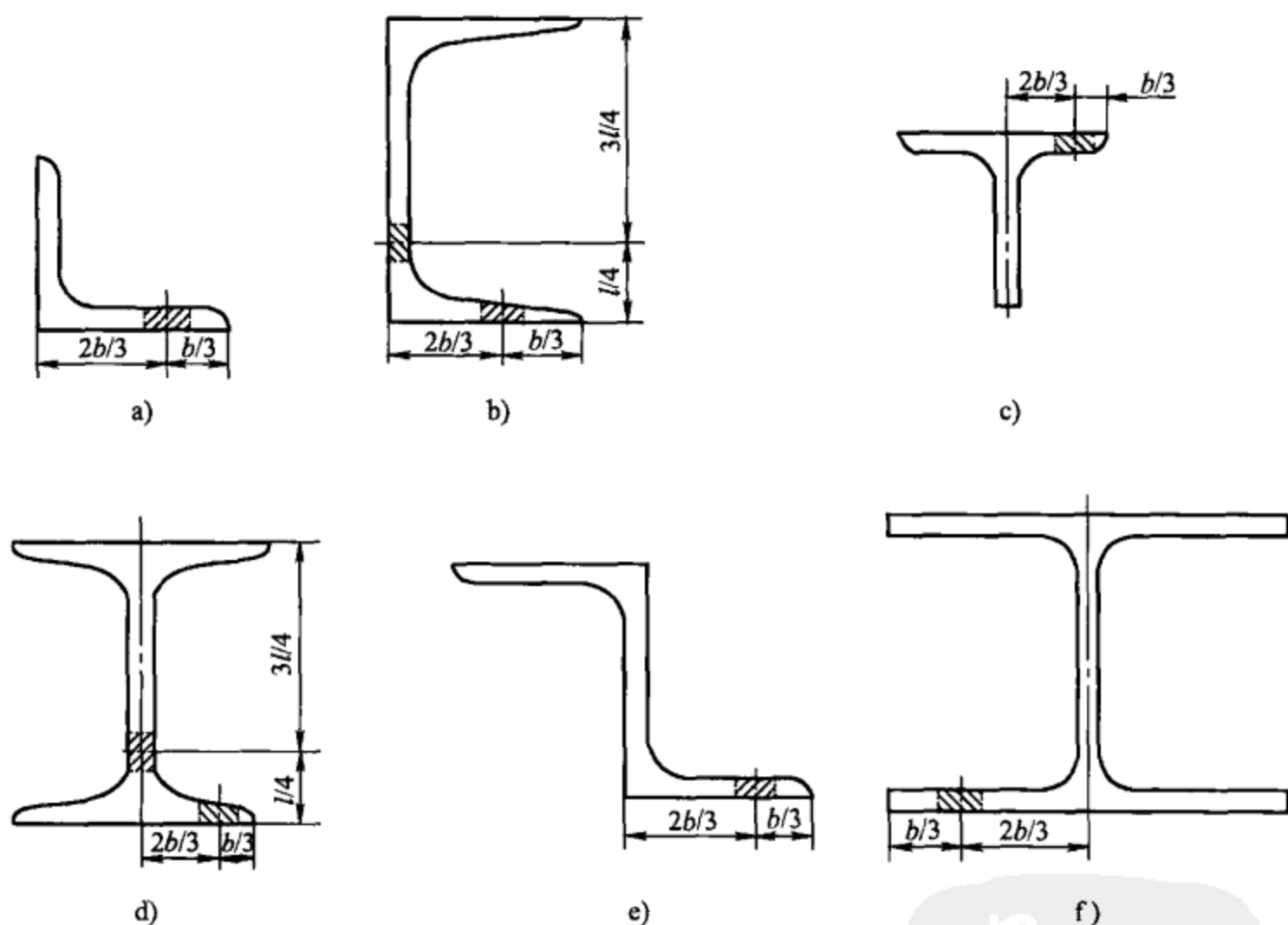


图 1-2 在型钢腿部宽度方向切取样坯的位置

a) 角钢 b) 槽钢 c) T形钢 d) 斜工字钢 e) Z形钢 f) 平工字钢

2) 在型钢腿部厚度方向切取拉伸样坯的位置如图 1-3 所示。

3) 如型钢尺寸不能满足要求, 可将取样位置向中部位移。对于腿部有斜度的型钢, 可在腰部  $1/4$  处取样, 也可从腿部取样进行机加工。

4) 对于腿部长短不相等的角钢, 可从任一腿部取样。

5) 对于腿部厚度不大于 50mm 的型钢, 当机加工和试验机能力允许时, 应按图 1-3a 切取拉伸样坯。当切取圆形横截面拉伸样坯时, 按图 1-3b 切取。

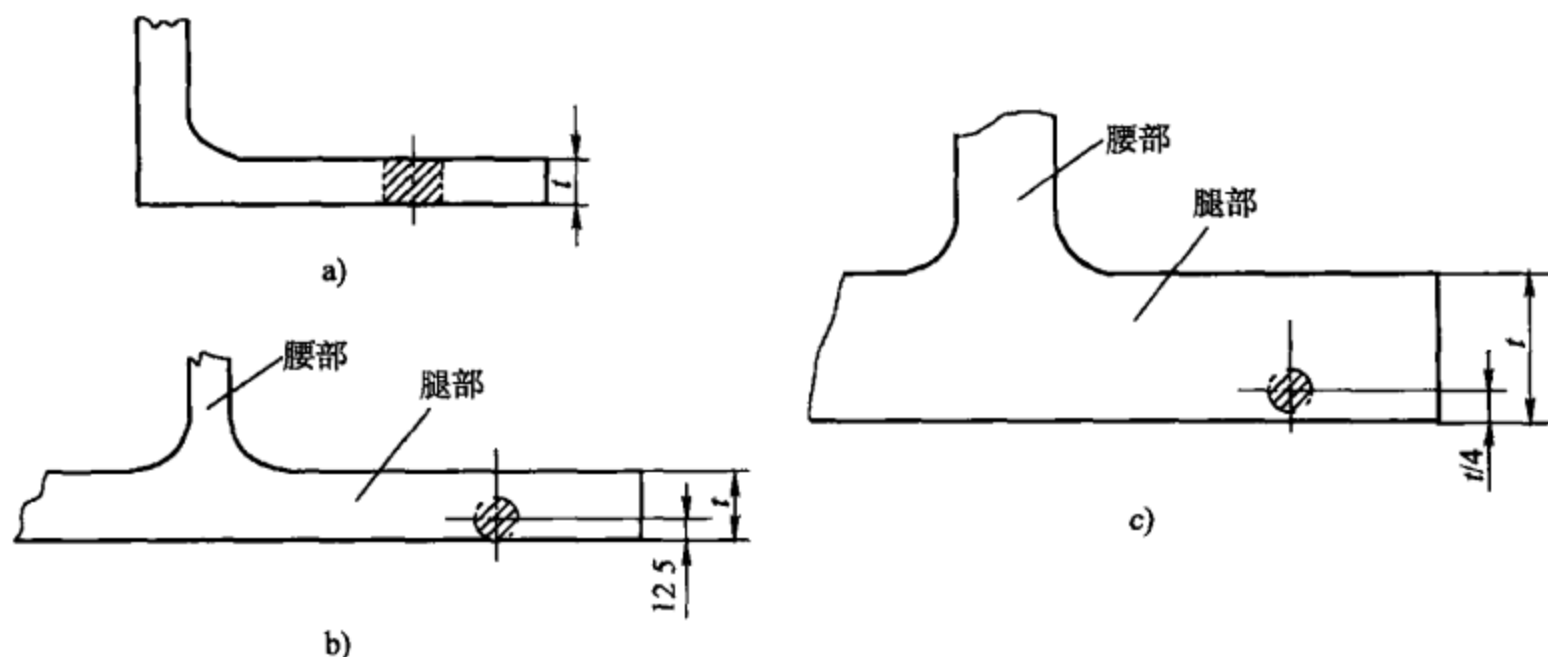


图 1-3 在型钢腿部厚度方向切取拉伸样坯的位置  
a)  $t \leq 50\text{mm}$  b)  $t \leq 50\text{mm}$  圆形试样 c)  $t > 50\text{mm}$  圆形试样

6) 对于腿部厚度大于 50mm 的型钢，当切取圆形横截面样坯时，按图 1-3c 切取。

7) 在型钢腿部厚度方向切取冲击样坯的位置如图 1-4 所示。

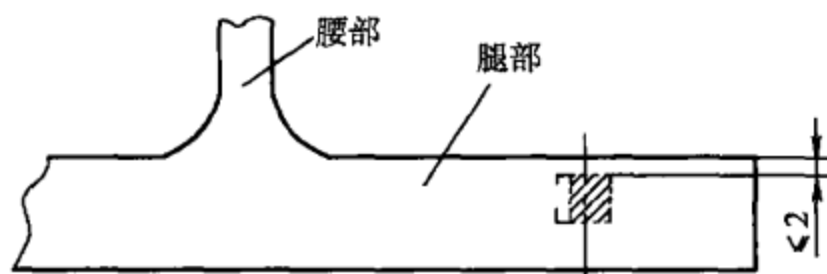


图 1-4 在型钢腿部厚度方向切取冲击样坯的位置

8) 对于扁钢的取样，规定在扁钢端部沿轧制方向、距边缘宽度 1/3 处切取拉伸、弯曲和冲击的样坯，如图 1-5 所示。

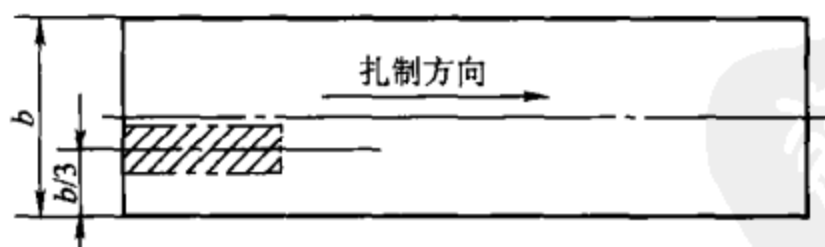


图 1-5 扁钢取样部位

当扁钢的厚度  $t \leq 25\text{mm}$ ，取下的样坯应加工成保留原轧制面的矩形截面拉伸试样。如果试验机吨位不能满足要求，则应加工成保留一个轧制面的矩形拉伸试样。

当扁钢的厚度  $t > 25\text{mm}$ ，可根据钢材厚度加工成圆形截面的比例试样，试样的中心线应尽可能接近钢材表面，即在头部保留不太显著的氧化皮。



9) 切取冲击试样的样坯时, 应在一侧保留原轧制面; 冲击试样的缺口轴线应垂直于该轧制面, 如图 1-6 所示。

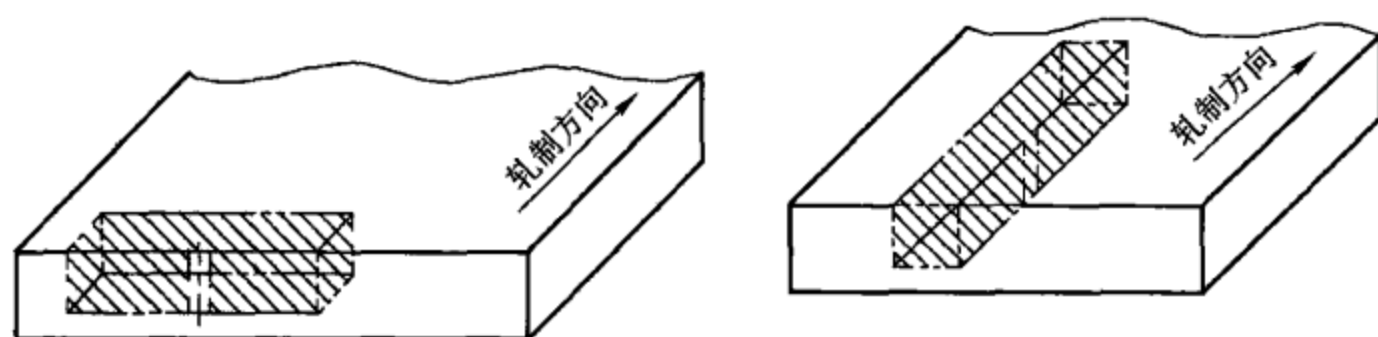


图 1-6 冲击试样缺口取向

10) 当扁钢的厚度  $t \leq 30\text{mm}$  时, 弯曲样坯的厚度应为钢材厚度; 当扁钢厚度  $t > 30\text{mm}$  时, 样坯应加工成厚度为  $20\text{mm}$  的试样, 并保留一个轧制面。

## 2. 条钢的取样

1) 在圆钢上切取拉伸样坯的位置如图 1-7 所示。当机加工和试验机能力允许时, 按图 1-7a 取样。

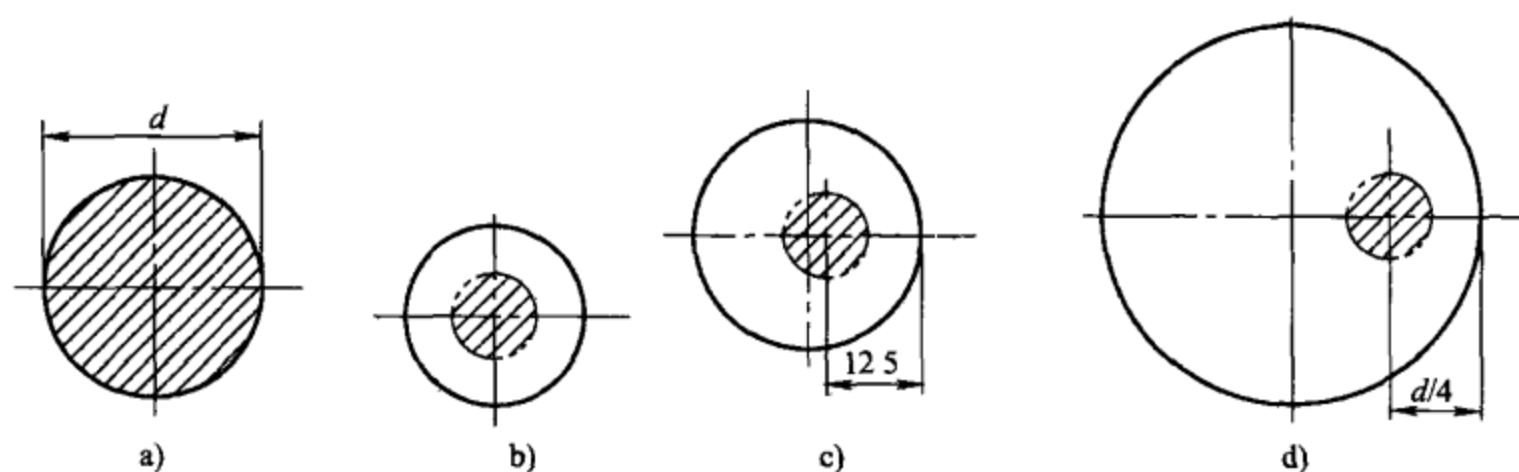


图 1-7 在圆钢上切取拉伸样坯的位置

a) 全横截面 b)  $d \leq 25\text{mm}$  c)  $d > 25\text{mm}$  d)  $d > 50\text{mm}$

2) 在圆钢上切取冲击样坯的位置如图 1-8 所示。

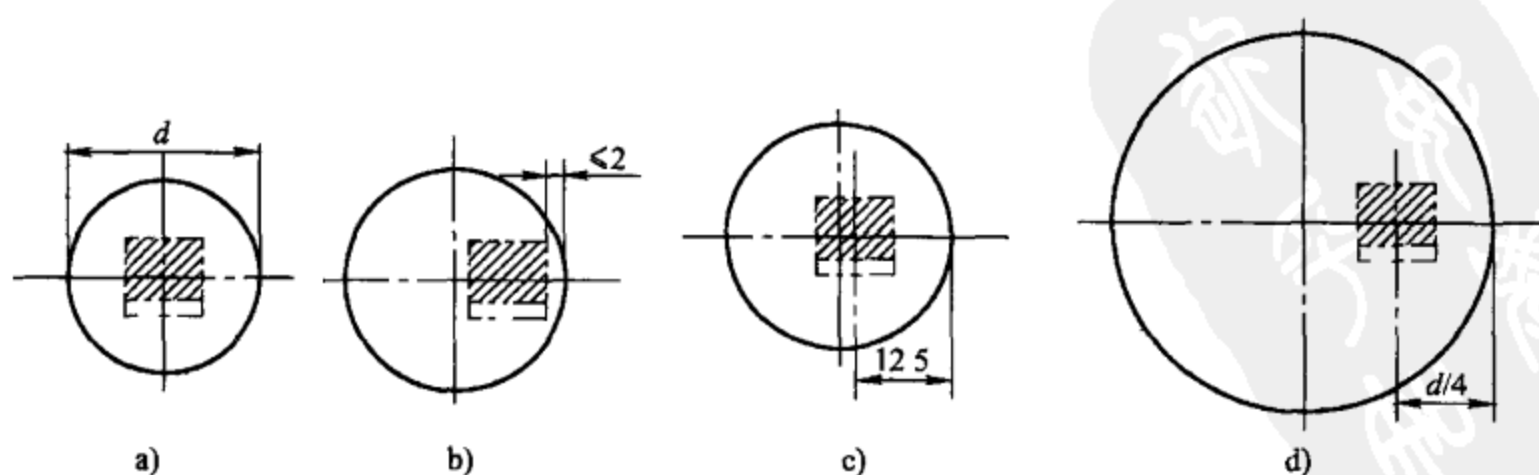


图 1-8 在圆钢上切取冲击样坯的位置

a)  $d \leq 25\text{mm}$  b)  $25\text{mm} < d \leq 50\text{mm}$  I 类 c)  $25\text{mm} < d \leq 50\text{mm}$  II 类 d)  $d > 50\text{mm}$

3) 在六角钢上切取拉伸样坯的位置如图 1-9 所示, 当机加工和试验机能力允许时, 按图 1-9a 取样。

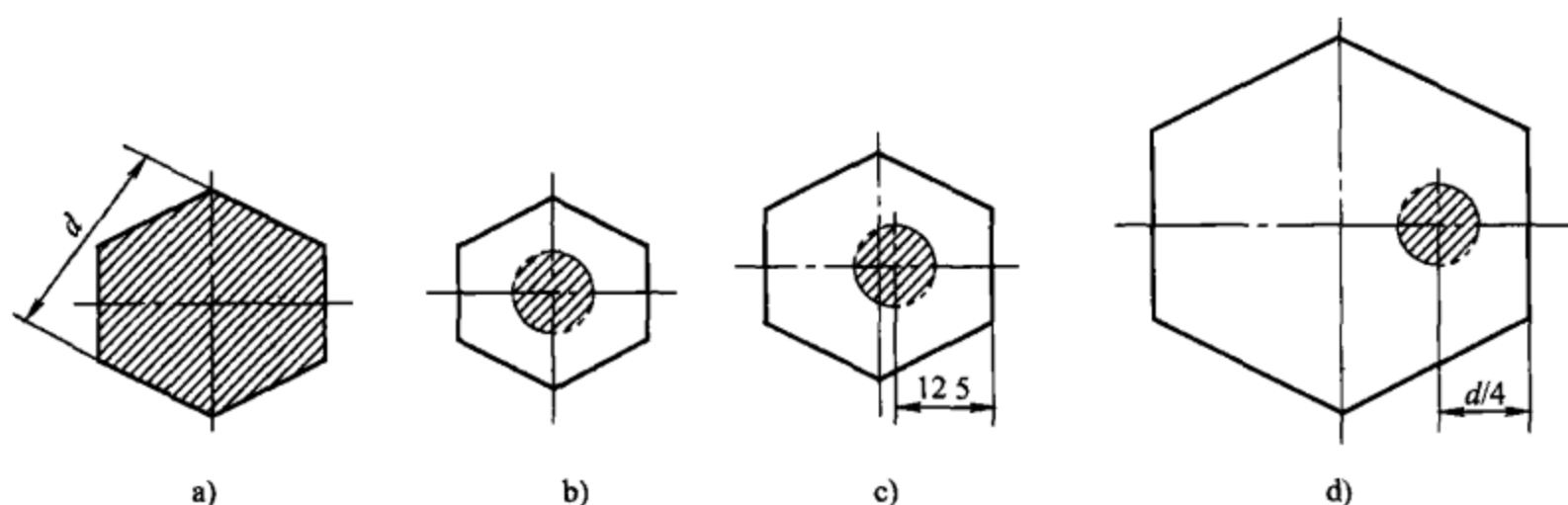


图 1-9 在六角钢上切取拉伸样坯的位置

a) 全横截面 b)  $d \leq 25\text{mm}$  c)  $25\text{mm} < d \leq 50\text{mm}$  d)  $d > 50\text{mm}$

4) 在六角钢上切取冲击样坯的位置如图 1-10 所示。

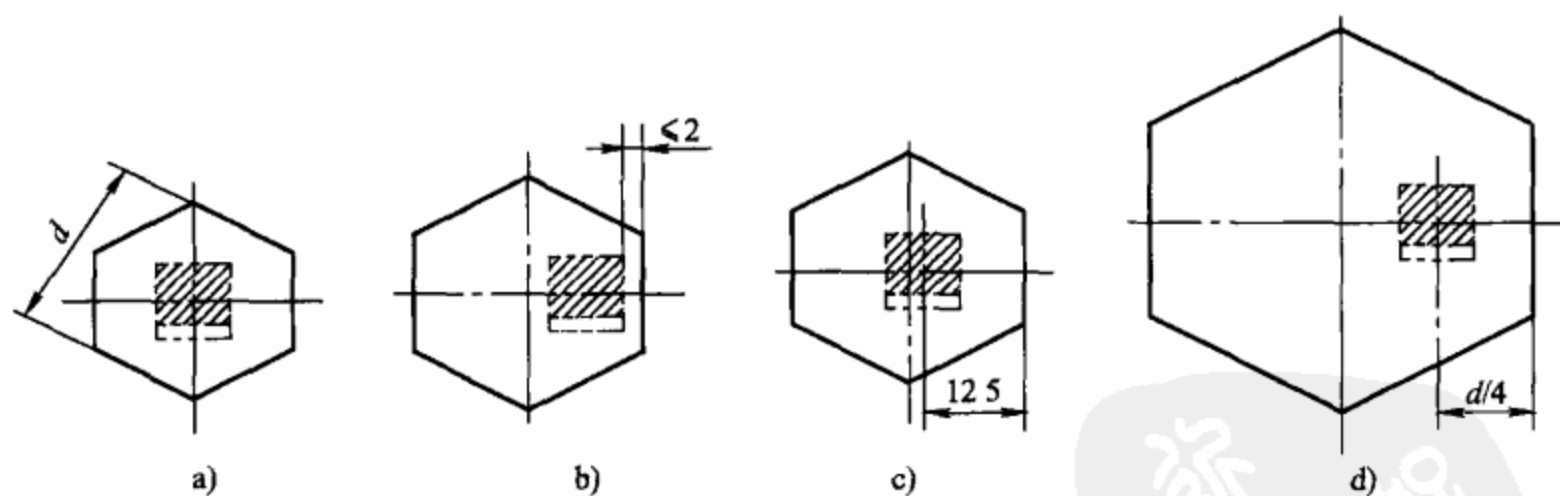


图 1-10 在六角钢上切取冲击样坯的位置

a)  $d \leq 25\text{mm}$  b)  $25\text{mm} < d \leq 50\text{mm}$  I类 c)  $25\text{mm} < d \leq 50\text{mm}$  II类 d)  $d > 50\text{mm}$

5) 在矩形截面条钢上切取拉伸样坯的位置如图 1-11 所示。当机加工和试验机能力允许时, 按图 1-11a 取样。

6) 在矩形截面条钢上切取冲击样坯的位置如图 1-12 所示。

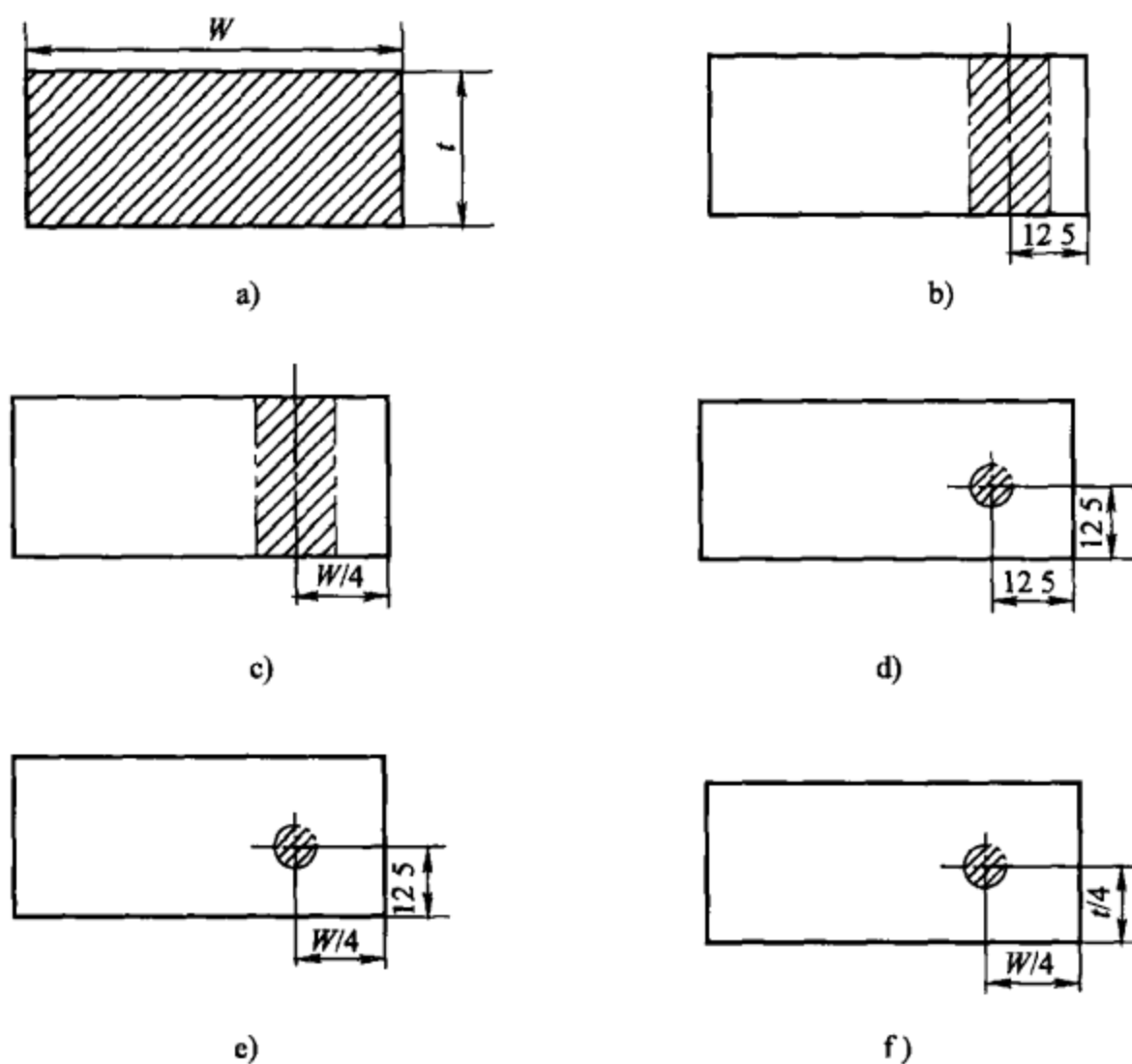


图 1-11 在矩形截面条钢上切取拉伸样坯的位置

- a) 全横截面 b)  $W \leq 50\text{mm}$  c)  $W > 50\text{mm}$  d)  $W \leq 50\text{mm}$  且  $t \leq 50\text{mm}$   
e)  $W > 50\text{mm}$  且  $t \leq 50\text{mm}$  f)  $W > 50\text{mm}$  且  $t > 50\text{mm}$

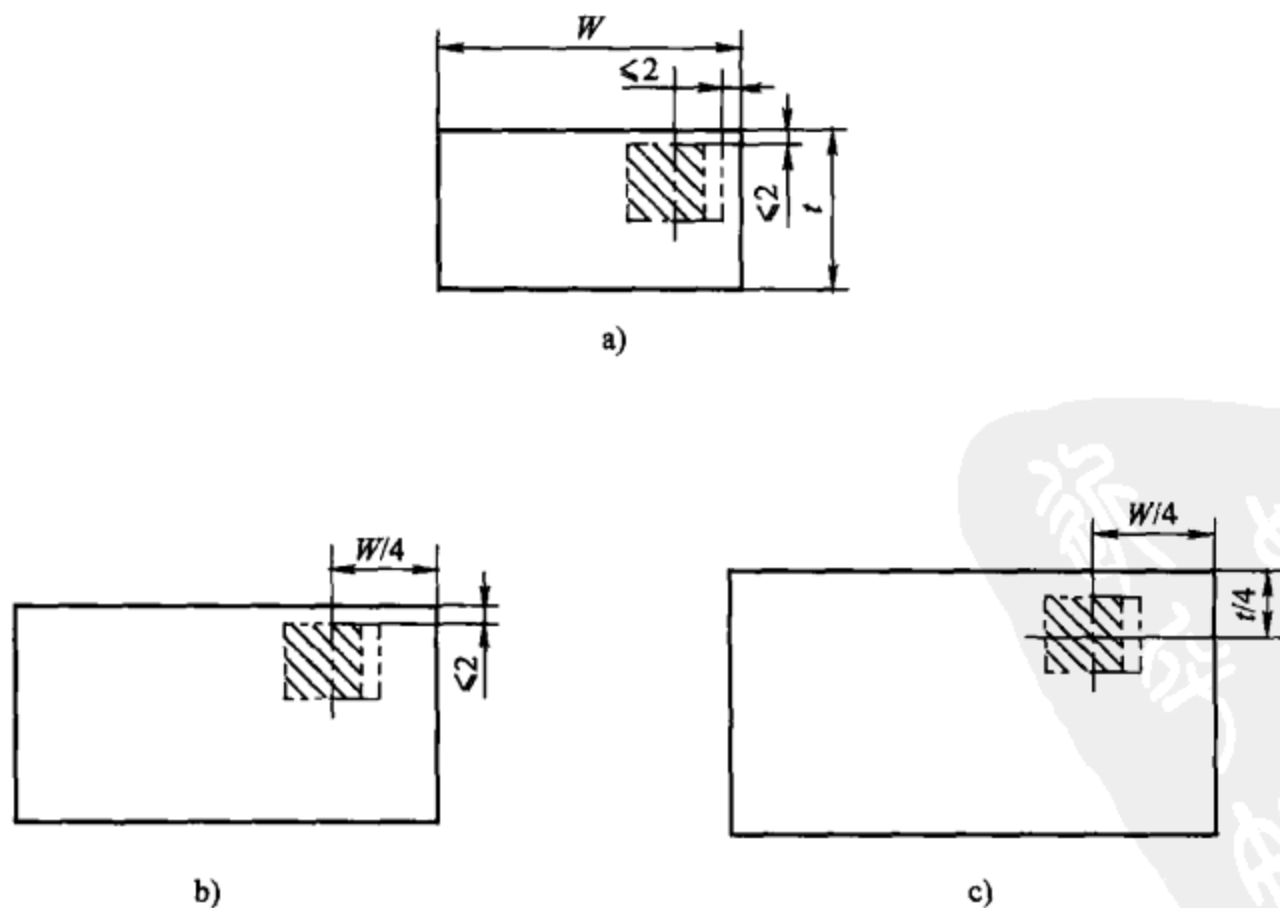


图 1-12 在矩形截面条钢上切取冲击样坯的位置

- a)  $12\text{mm} \leq W \leq 50\text{mm}$  且  $t \leq 50\text{mm}$  b)  $W > 50\text{mm}$  且  $t \leq 50\text{mm}$  c)  $W > 50\text{mm}$  且  $t > 50\text{mm}$

### 3. 钢板的取样

1) 应在钢板宽度  $1/4$  处切取拉伸样坯, 如图 1-13 所示。当机加工和试验机能力允许时, 应按图 1-13a 取样。对于纵轧钢板, 当产品标准没有规定取样方向时, 应在钢板宽度  $1/4$  处切取横向样坯, 如钢板宽度不足, 样坯中心可以内移。

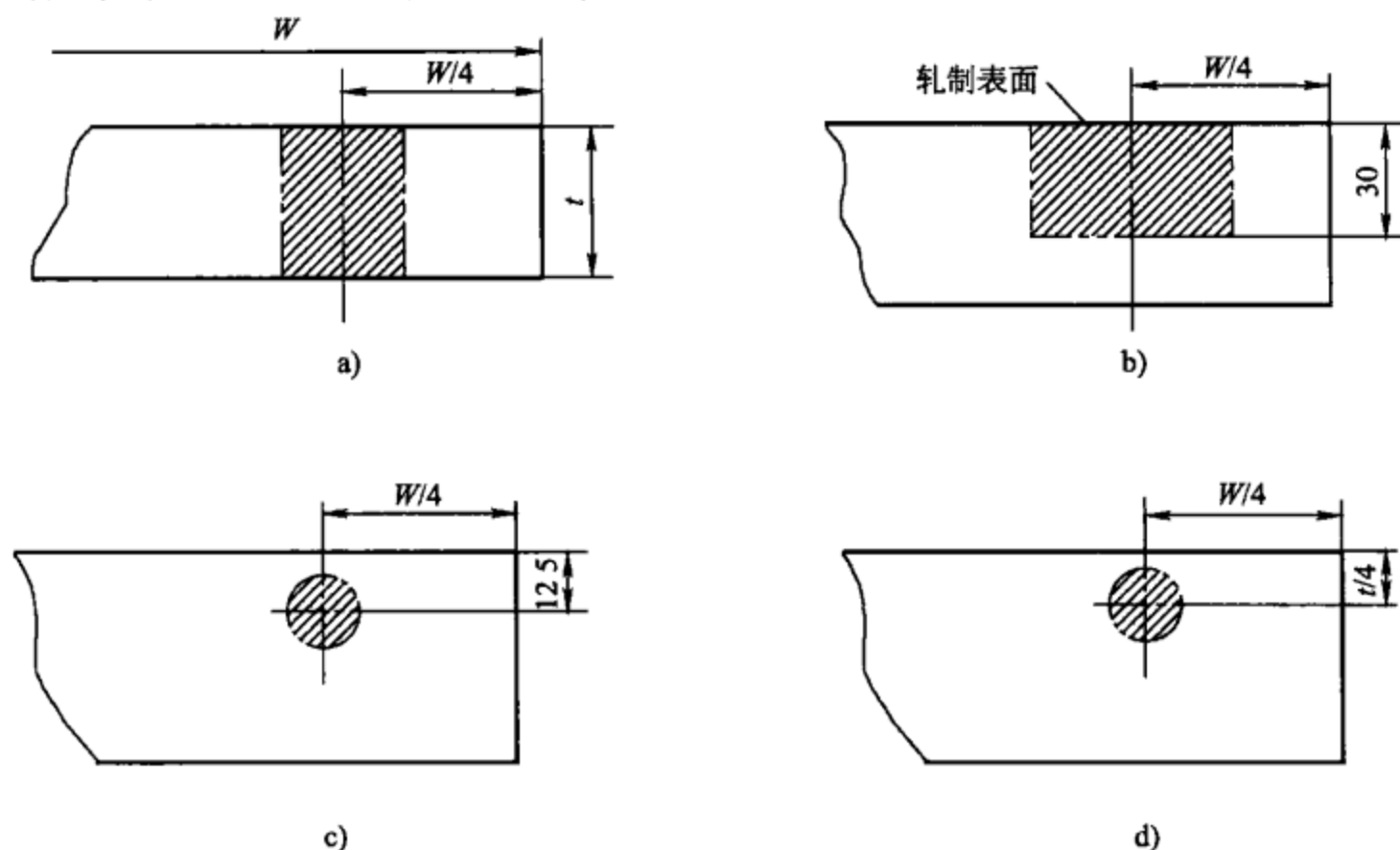


图 1-13 在钢板上切取拉伸样坯的位置

a) 全厚度 b)  $t > 30\text{mm}$  c)  $25\text{mm} < t < 50\text{mm}$  d)  $t \geq 50\text{mm}$

2) 在钢板厚度方向切取冲击样坯位置如图 1-14 所示。

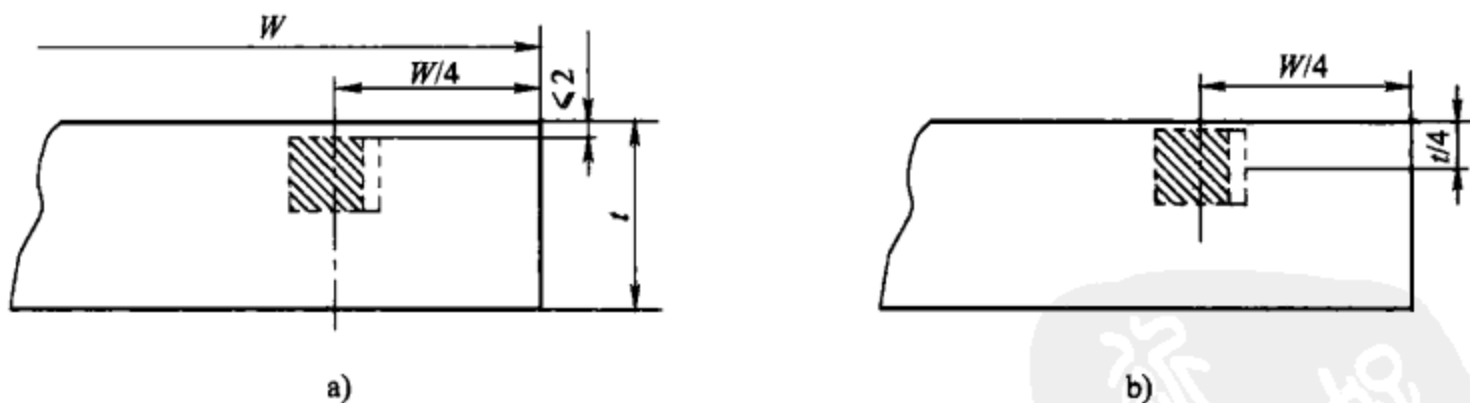


图 1-14 在钢板上切取冲击样坯的位置

a) 全部  $t$  值 b)  $t > 40\text{mm}$

### 4. 管材的取样

1) 在钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置如图 1-15 所示。当机加工和试验机能力允许时, 应按图 1-15a 取样。

2) 在钢管上切取冲击样坯的位置如图 1-16 所示。



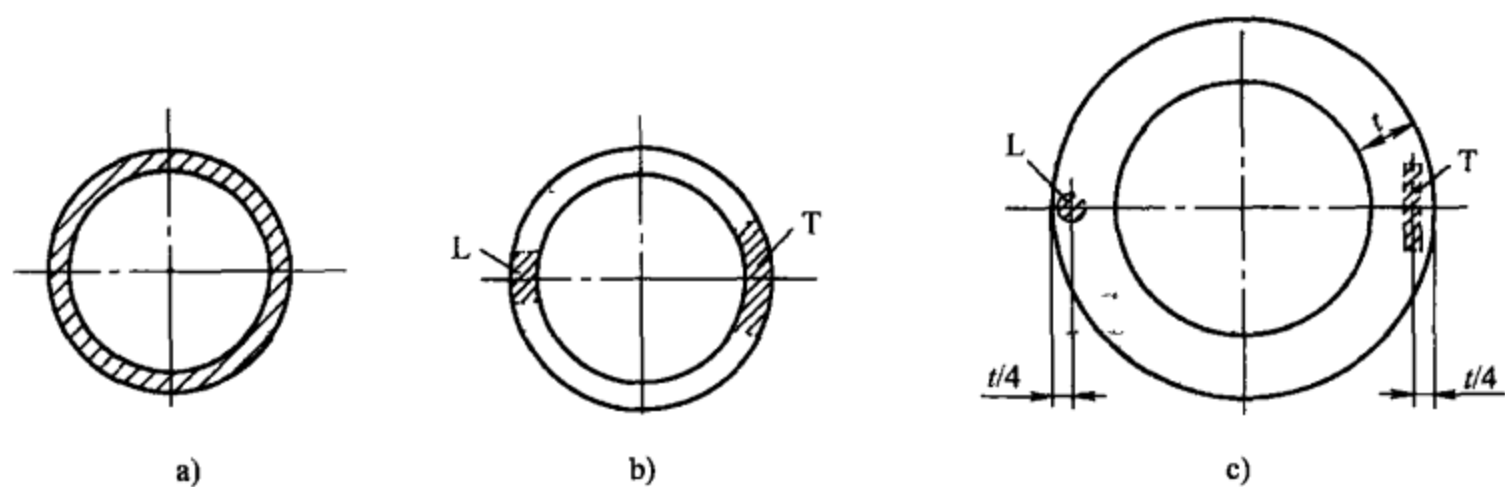


图 1-15 在钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置

a) 全横截面 b) 矩形横截面 c) 圆形横截面

注：L 表示纵向试样（试样纵向轴线与主加工方向平行），T 表示横向试样（试样纵向轴线与主加工方向垂直），以下同。

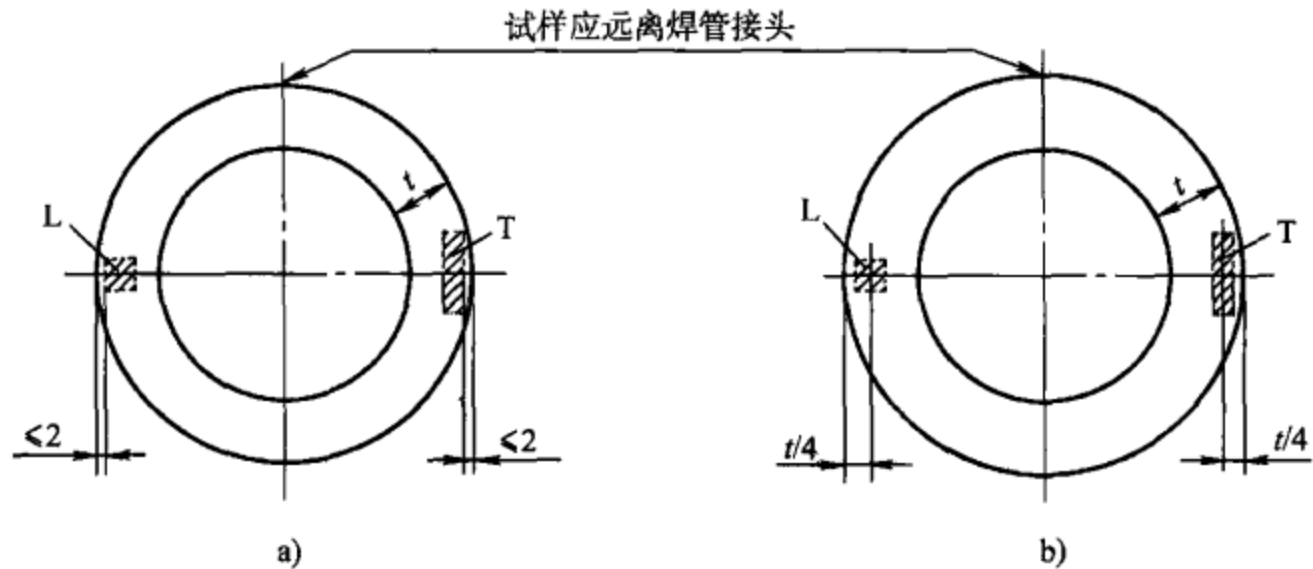


图 1-16 在钢管上切取冲击样坯的位置

a)  $t \leq 40\text{mm}$  b)  $t > 40\text{mm}$

3) 在方形钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置如图 1-17 所示。

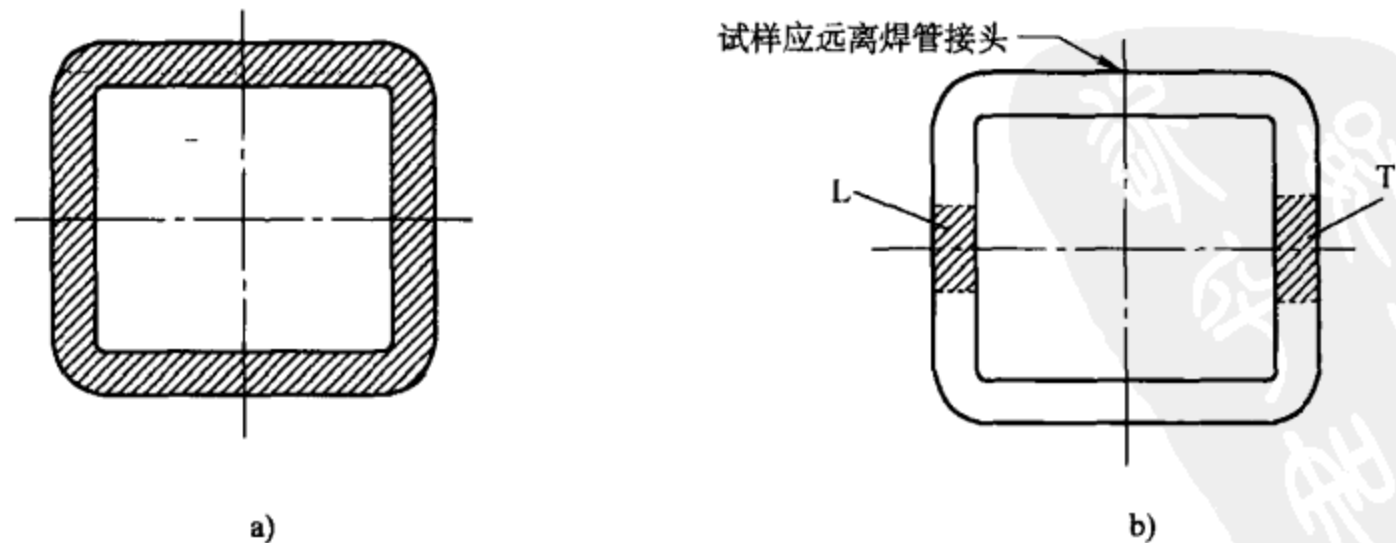


图 1-17 在方形钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置

a) 全横截面 b) 矩形横截面

4) 在方形钢管上切取冲击样坯的位置如图 1-18 所示。

### 5. 焊接接头的取样

GB/T 2649—1989 规定了金属材料的熔焊和压焊接头的冲击、拉伸、弯曲、硬度、压扁、冷作时效和疲劳等试验的取样法。

(1) 焊接试板的制备 试板是模拟产品或构件的制造技术条件而焊制成的试验板或管接头。力学试验用的试样样坯就是从专门焊接的试板或管接头中截取，在特殊情况下也可从结构件上直接截取。焊接前试板的截取方位应符合相应的产品制造技术条件

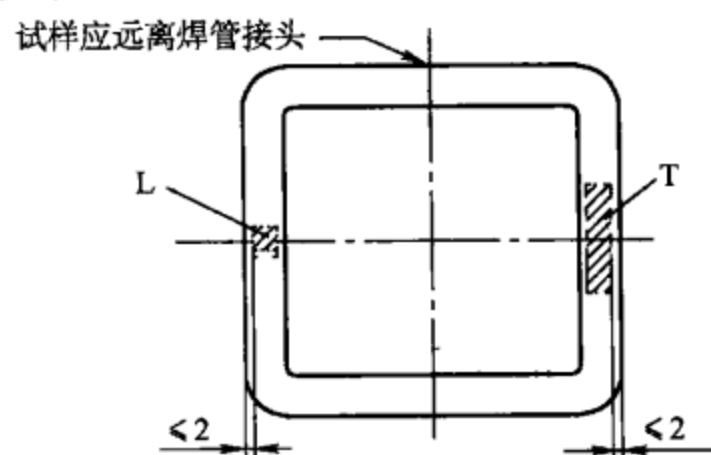


图 1-18 在方形钢管上切取冲击样坯的位置

或冶金产品技术条件的规定。试板用母材、焊接材料、焊接条件以及焊后热处理均应与相应产品或构件的制造条件相同。熔焊和压焊的试板厚度及每侧宽度应符合表 1-2 的规定。

表 1-2 试板厚度及每侧宽度

(单位: mm)

试板厚度	试板每侧宽度	试板厚度	试板每侧宽度
$\leq 10$	$\geq 80$	$> 24 \sim 50$	$\geq 150$
$> 10 \sim 24$	$\geq 100$	$> 50$	$\geq 200$

试板长度应根据样坯尺寸、数量、切口宽度、加工余量以及两端不能利用的区段（如电弧焊的引弧端和收弧端）予以综合考虑。不能利用的区段长度应根据试板厚度和焊接工艺加以考虑，但不得小于 25mm。从结构件或试板上截取的样坯，一般都不允许矫直。如焊后需正火或调质处理，则允许在热处理前进行矫直。如焊后不进行热处理，则允许将已制备的试样在非受试验部分矫直。

试板挠度  $f$  如图 1-19 所示，在 200mm 长度内不应超过板（壁）厚的 10%，且不得大于 4mm。对接接头平板错位  $h$ （如图 1-20 所示），不应超过板厚的 15%，且不得大于 4mm。

试板可用任意方法打上标记，但应在受试部分之外。

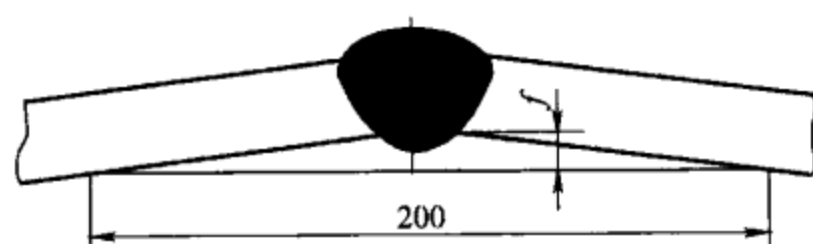


图 1-19 焊接试板挠度  $f$  示意图


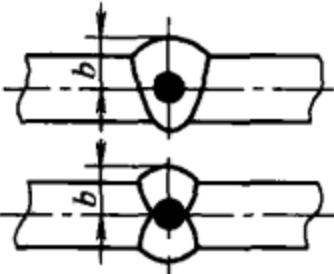

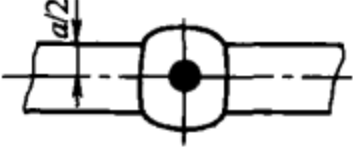
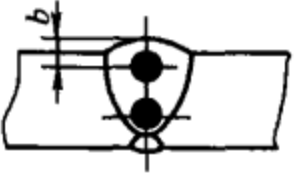
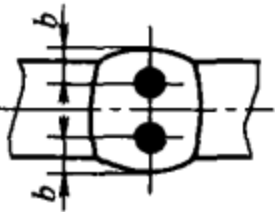


图 1-20 对接接头平板错位  $h$  示意图

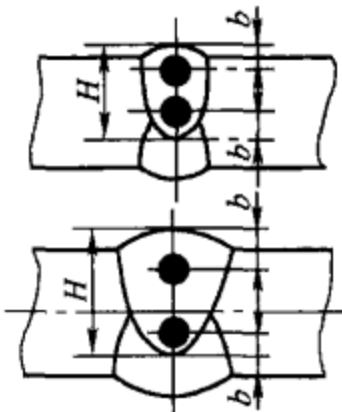
(2) 样坯的截取 从试板中截取样坯时，一般采用机械切削方法。也可用剪床、等离子或火焰切割的方法截取，但均应考虑其加工余量，保证受试部分金属性能不受影响。从结构件中截取的试板尺寸应根据试样数量和切口宽度来决定。如果直接从结构件中用火焰切割截取样坯时，除考虑加工余量外，还需保证试样上不得留有火焰切割的热影响区。各种试验的样坯截取方位应按下列规定进行。

1) 焊缝金属拉伸样坯截取位置如表 1-3 所示。多层焊缝的样坯截取方位如无特殊要求时，应尽量靠近焊缝表层截取。

表 1-3 焊缝金属拉伸样坯截取位置

试板厚度/mm	焊接方法	样坯方位	说明
焊缝直角边 大于 6×6	电弧焊		样坯位于焊缝中心
5 ~ 16	气焊或电弧焊		$b$ 不大于 $\frac{D}{2} + 2\text{mm}$
> 16 ~ 36	气焊或 电弧焊		$b$ 不大于 $\frac{D}{2} + 2\text{mm}$
	电渣焊		
> 36 ~ 60	电弧焊		$b$ 不大于 $\frac{D}{2} + 2\text{mm}$
	电渣焊		

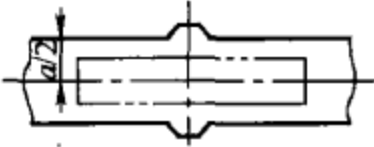
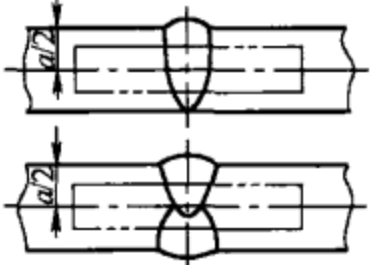


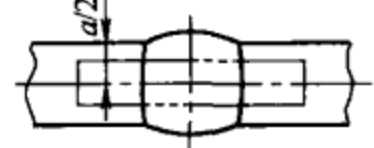
(续)

试板厚度/mm	焊接方法	样坯方位	说明
$H > 36 \sim 60$	电弧焊		1) $b$ 不大于 $\frac{D}{2} + 2\text{mm}$ 2) 样坯均从后焊一侧截取

注： $a$  是试板厚度，单位为 mm； $b$  是从焊缝表面至样坯中心距离，单位为 mm； $D$  是试样端头直径，单位为 mm； $H$  是焊缝熔深，单位为 mm。

2) 焊接接头冲击样坯截取位置如表 1-4 所示。

表 1-4 焊缝接头冲击样坯截取位置

试板厚度/mm	焊接方法	样坯方位	说明
5 ~ 16	压焊		
	电弧焊或气焊		
> 16 ~ 40	压焊		$c = 1 \sim 3\text{mm}$
	电弧焊		
	电渣焊		



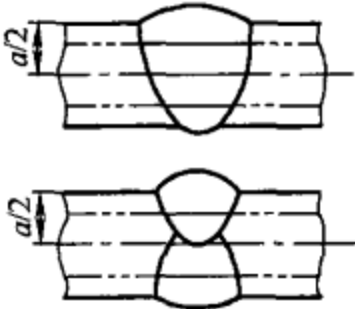
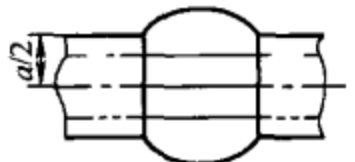
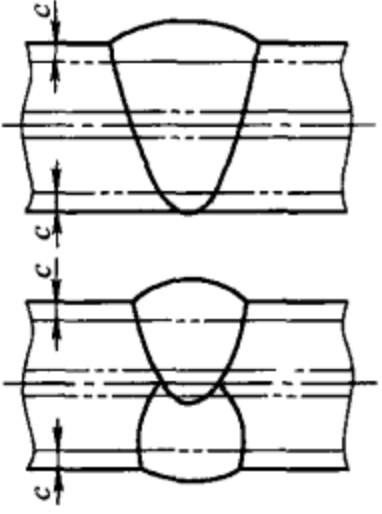
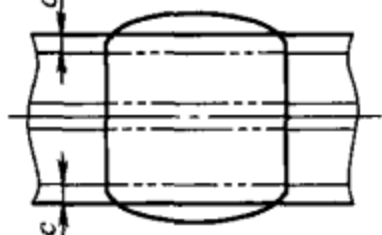
(续)

试板厚度/mm	焊接方法	样坯方位	说明
>40 ~ 60	电弧焊		$c = 1 \sim 3 \text{ mm}$
	电渣焊		$c \geq 8 \text{ mm}$
>60 ~ 100	电弧焊		$c = 1 \sim 3 \text{ mm}$
	电渣焊		$c \geq 8 \text{ mm}$
$H = 18 \sim 40$	电弧焊		1) $c = 1 \sim 3 \text{ mm}$ 2) 样坯均从后焊一侧截取
$H > 40 \sim 60$			

注:  $a$  是试板厚度, 单位为 mm;  $c$  是试样表面至样坯表面的距离, 单位为 mm;  $H$  是焊缝熔深, 单位为 mm。

3) 焊接接头的拉伸、弯曲、疲劳样坯截取位置如表 1-5 所示。

表 1-5 焊接接头拉伸、弯曲、疲劳样坯截取位置

试板厚度/mm	焊接方法	样坯方位	说明
≤36	电弧焊		
	电渣焊		
>36 ~ 100	电弧焊		$c = 1 \sim 3\text{mm}$
	电渣焊		$c \geq 8\text{mm}$

注： $a$  是试板厚度，单位为 mm； $c$  是试样表面至样坯表面的距离，单位为 mm。

4) 点焊接头剪切样坯截取位置如图 1-21 所示。

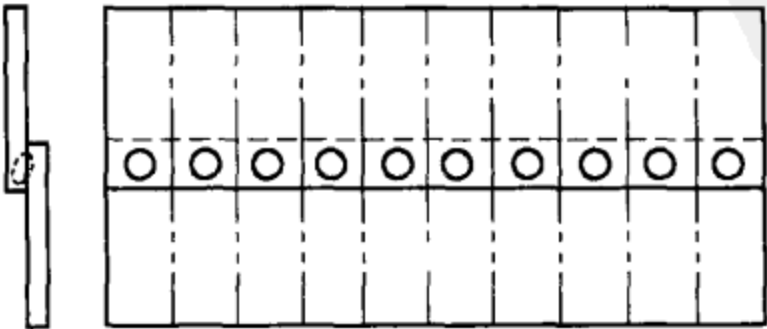


图 1-21 点焊接头剪切样坯截取位置

5) 接头拉伸和焊缝金属拉伸试样均不得少于两个；接头冲击和冷作时效敏感性冲击试样均不少于三个；点焊接头抗剪试样不少于五个；疲劳试样不少于六个；压扁试样不少于一个。

6) 样坯截取位置根据焊缝外形及无损检测结果，在试板的有效利用长度内作适当分布。样坯从试板或管接头上的截取位置如图 1-22 ~ 图 1-24 所示。

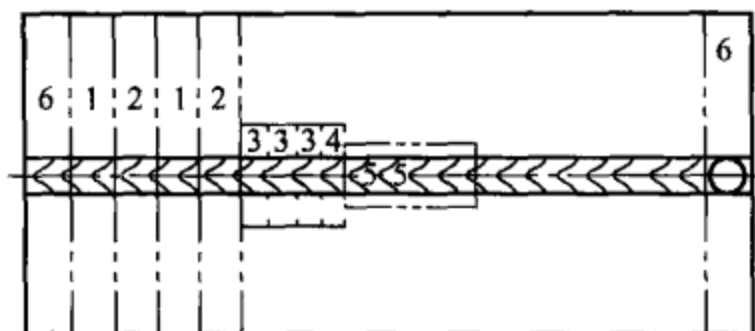


图 1-22 熔焊试板样坯截取位置

1—拉伸 2—弯曲 3—冲击 4—硬度 5—焊接拉伸 6—舍弃

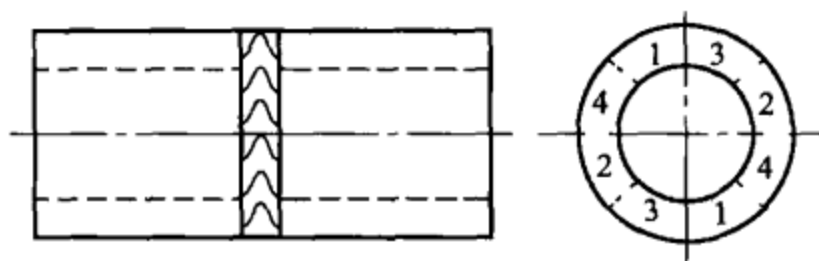


图 1-23 熔焊管接头样坯截取位置

1—拉伸 2—弯曲 3—冲击 4—硬度

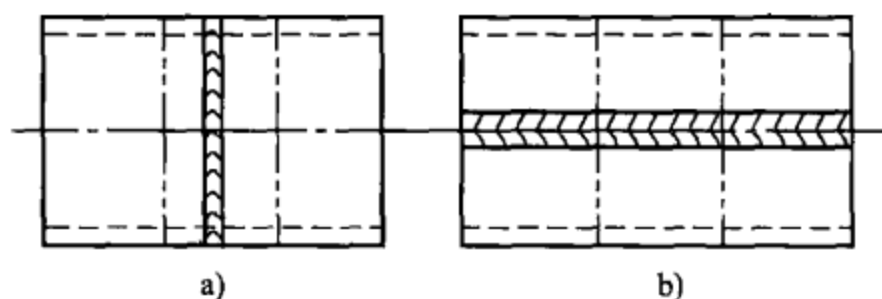


图 1-24 熔焊管接头压扁样坯截取位置

a) 环缝压扁 b) 纵缝压扁

## 6. 灰铸铁的取样

灰铸铁件的力学性能应分批检验。试样用同一炉次、同一牌号的铁液在干型内浇铸。每组至少浇三根，采用立浇底注。

1) 需要进行热处理的铸件，其试样应与铸件一起进行热处理。试样放置位置应考虑到与铸件热处理条件一致，但进行消除应力的时效处理时，试样可不进行预热处理。

2) 进行拉伸和弯曲试验的铸件试样一组用三根。一般先进行弯曲试验，若三

根中有两根合格，即认为该批铸件为合格，若弯曲性能不合格，则进行拉伸试验，同样若三根中有两根合格，则认为拉伸性能合格，一般拉伸试样用弯曲试验后的半段加工而成。

3) 灰铸铁的弯曲试样一般取毛坯试样，不进行加工，尺寸如表 1-6 所示，弯曲试验条件如表 1-7 所示。

表 1-6 灰铸铁弯曲试样尺寸 (单位: mm)

试样直径 $d$	直径允许偏差		长度 $L$	最大与最小直径偏差
	毛坯试样	加工试样		
13	$\pm 1.0$	$\pm 0.1$	160	0.4
20	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	240	0.6
30	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	340	0.9
45	$\pm 1.4$	$\pm 0.2$	500	1.3

表 1-7 弯曲试验条件

试样直径 $d/\text{mm}$	支承跨距 $l_0/\text{mm}$	测量精度			初载荷/ $\text{N}$
		直径/ $\text{mm}$	载荷/ $\text{N}$	挠度/ $\text{mm}$	
13	130	0.1	49	0.1	59 ~ 98
20	200	0.1	98	0.1	196 ~ 294
30	300	0.1	196	0.2	294 ~ 490
45	450	0.2	490	0.3	294 ~ 490

4) 灰铸铁的拉伸试样如图 1-25 所示，其尺寸规定如表 1-8 所示。

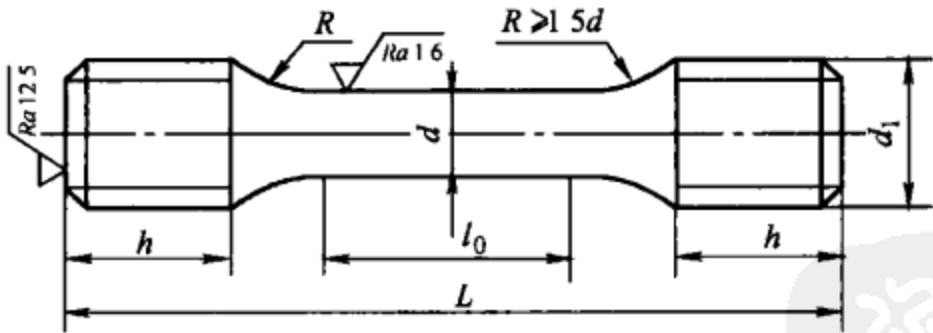


图 1-25 灰铸铁拉伸试样

表 1-8 灰铸铁拉伸试样尺寸 (单位: mm)

毛坯直径	试样直径 $d$	平行部分长度 $l_0$	螺纹直径 $d_1$	端部长度 $h$	总长 $L$
13	$8 \pm 0.05$	8	M12	16	54 ~ 56
20	$13 \pm 0.05$	13	M18	24	82 ~ 87
30	$20 \pm 0.1$	20	M28	36	126 ~ 132
45	$30 \pm 0.2$	30	M42	50	174 ~ 180

## 7. 铸钢的取样

碳素钢铸件力学性能试验用的毛坯试样应在浇铸中单独浇出。毛坯主要尺寸和试样切取位置应符合图 1-26 的要求。

毛坯试样要随所代表的铸件一起热处理。不同熔炼炉次但同牌号的一批铸件同炉热处理时，应按每一熔炼炉次检验；同一熔炼炉次的同一批铸件，在固定的热处理工艺条件和稳定热处理质量条件下，分炉热处理时允许抽检。

每次抽检一个拉伸试样和两个冲击试样。如果某项目有一个试样的性能不合格，则应加倍取样；如果其中再有一个不合格，则应将所代表的铸件连同备用试样再次热处理，然后进行力学性能复验。

## 8. 球墨铸铁的取样

1) 球墨铸铁的力学性能试验采用梅花试样、基尔试样和楔形试样（即 Y 形试样）。为了进行疲劳试验，三种类型试样的长度应不小于 230mm，一般取 250 ~ 260mm。

2) 试样应单独浇出，在干砂型或湿砂型中均可浇铸。

3) 如需进行冲击试验，则牌号 QT400-10 及 QT450-5 的球墨铸铁可用 10mm × 10mm × 55mm 的无切口试样，其余牌号均用 20mm × 20mm × 120mm 的无切口试样。

4) 浇铸时，每批铁液浇一组试样。每批系指同一牌号、同一配料与同一生产工艺过程中生产的铸件。

5) 试验时，一组应有三个试样，其中两个的抗拉强度和伸长率合格，则其所代表的铸件性能为合格。如不合格，则其复验的方法（取样个数及评判标准）均由订货技术条件规定。如试棒有缺陷，试验结果作废。

6) 球墨铸铁的拉伸试样形状及尺寸分别如图 1-27 和表 1-9 所示。

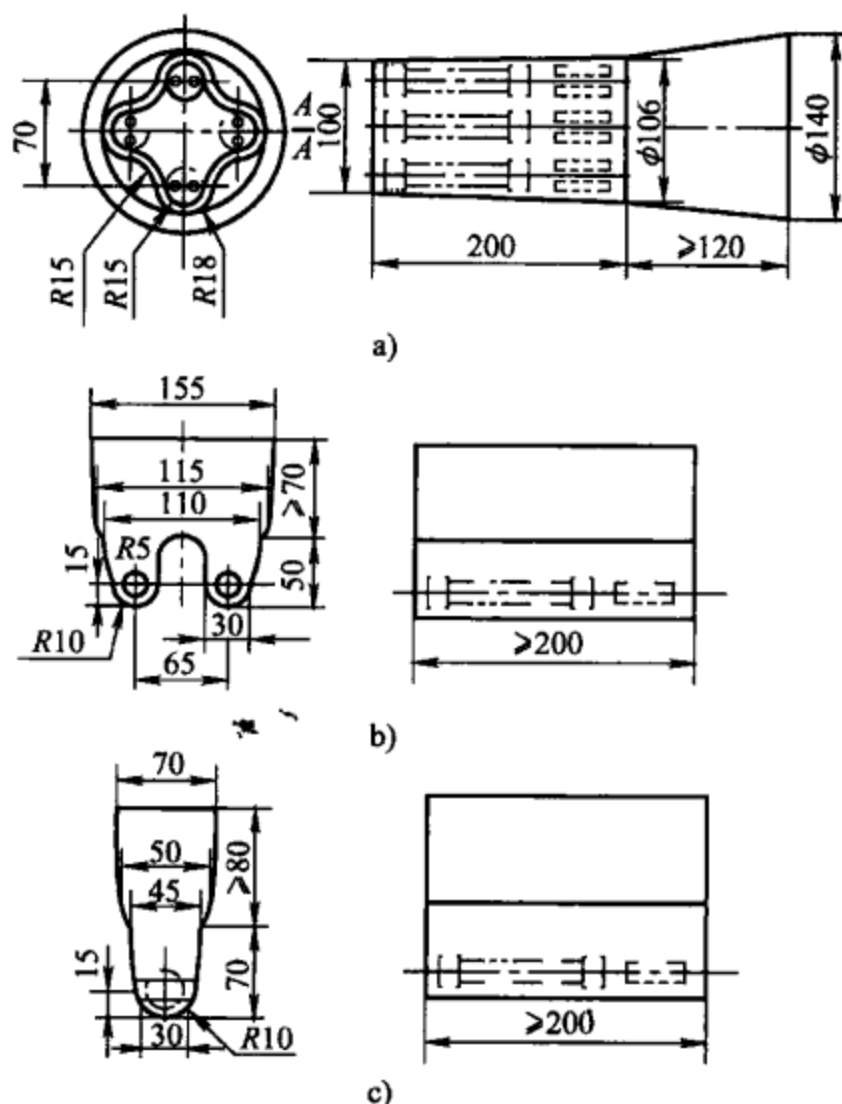


图 1-26 铸钢的三种试样类型

a) 梅花试样 b) 基尔试样 c) 楔形试样

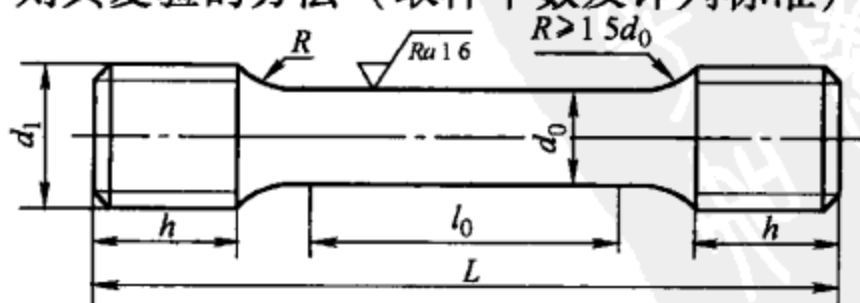


图 1-27 球墨铸铁拉伸试样



表 1-9 球墨铸铁拉伸试样尺寸的选择

毛坯直径/mm	试样直径 $d_0$ /mm	工作部分长度 $l_0$ /mm	端部长度 $h$ /mm	螺纹部分直径 $d_1$ /mm	总长 $L$ /mm
13	$8 \pm 0.05$	40	16	M12	90
18	$10 \pm 0.05$	50	20	M16	110
20	$13 \pm 0.05$	65	24	M18	140
30	$20 \pm 0.10$	100	36	M28	210
45	$30 \pm 0.20$	150	50	M42	310

1.3 数值修约规则

1.3.1 术语和定义

(1) 数值修约 通过省略原数值的最后若干位数字，调整所保留的末位数字，使最后所得到的值最接近原数值的过程。经数值修约后的数值称为（原数值的）修约值。

(2) 修约间隔 修约值的最小数值单位。修约间隔的数值一经确定，修约值即为该数值的整数倍。如指定修约间隔为 0.1，修约值应在 0.1 的整数倍中选取，相当于将数值修约到一位小数。如指定修约间隔为 100，修约值应在 100 的整数倍中选取，相当于将数值修约到“百”数位。

(3) 极限数值 标准（或技术规范）中规定考核的以数量形式给出且符合该标准（或技术规范）要求的指标数值范围的界限值。

1.3.2 数值修约规则

1. 确定修约间隔

- 1) 指定修约间隔为  $10^{-n}$ （ $n$  为正整数），或指明将数值修约到  $n$  位小数。
- 2) 指定修约间隔为 1，或指明将数值修约到“个”数位。
- 3) 指定修约间隔为  $10^n$ （ $n$  为正整数），或指明将数值修约到  $10^n$  数位，或指明将数值修约到“十”、“百”、“千”等数位。

2. 进舍规则

- 1) 拟舍弃数字的最左一位数字小于 5，则舍去，保留其余各位数字不变。例如将 12.1498 修约到个數位，得 12；将 12.1498 修约到一位小数，得 12.1。
- 2) 拟舍弃数字的最左一位数字大于 5，则进一，即保留数字的末位数字加 1。例如将 1268 修约到“百”数位，得  $13 \times 10^2$ （特定场合可写为 1300）。
- 3) 拟舍弃数字的最左一位数字是 5，且其后有非 0 数字时进一，即保留数字

的末位数字加 1。例如将 10.5002 修约到个数位，得 11。

4) 拟舍弃数字的最左一位数字为 5，且其后无数字或皆为 0 时，若所保留的末位数字为奇数 (1, 3, 5, 7, 9) 则进一，即保留数字的末位数字加 1；若所保留的末位数字为偶数 (0, 2, 4, 6, 8)，则舍去。例如修约间隔为 0.1 时，拟修约数值 1.050 修约为  $10 \times 10^{-1}$  (特定场合可写成 1.0)。

5) 负数修约时，先将它的绝对值按 1) ~ 4) 的规定进行修约，然后在所得值前面加上负号。例如将 -0.0365 修约到三位小数为  $-36 \times 10^{-3}$  (特定场合可写为 -0.036)。

6) 不得多次连续修约。拟修约数字应在确定修约间隔或指定修约数位后一次修约获得结果，不得多次连续修约。例如修约 97.46，修约间隔为 1。正确的做法：97.46 → 97；不正确的做法：97.46 → 97.5 → 98。

### 3. 修约程序

在具体实施中，有时测试与计算部门先将获得数值按指定的修约数位多一位或几位报出，而后由其他部门判定。为避免产生连续修约的错误，应按下述步骤进行。

1) 报出数值最右的非零数字为 5 时，应在数值右上角加 “+” 或加 “-” 或不加符号，分别表明已进行过舍、进或未舍未进。例如 16.50<sup>+</sup> 表示实际值大于 16.50，经修约舍弃为 16.50；16.50<sup>-</sup> 表示实际值小于 16.50，经修约进一为 16.50。

2) 如对报出值需进行修约，当拟舍弃数字的最左一位数字为 5，且其后无数字或皆为零时，数值右上角有 “+” 者进一，有 “-” 者舍去。数字修约到个数位示例如表 1-10 所示。

表 1-10 数字修约到个数位示例

实测值	报出值	修约值	实测值	报出值	修约值
15.4546	15.5 <sup>-</sup>	15	-16.5203	-16.5 <sup>+</sup>	-17
-15.4546	-15.5 <sup>-</sup>	-15	17.5000	17.5	18
16.5203	16.5 <sup>+</sup>	17			

### 4. 0.5 单位修约与 0.2 单位修约

(1) 0.5 单位修约 (半个单位修约) 0.5 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.5 单位进行的修约。0.5 单位修约方法如下：将拟修约数值  $X$  乘以 2，按指定修约间隔对  $2X$  进行修约，所得数值 (小于  $2X$  修约值) 再除以 2。按 0.5 单位修约到个位数示例如表 1-11 所示。

表 1-11 按 0.5 单位修约到个位数示例

拟修约数值 $X$	$2X$	$2X$ 修约值	$X$ 修约值
60.25	120.50	120	60.0
60.38	120.76	121	60.5
60.28	120.56	121	60.5
-60.75	-121.50	-122	-61.0

(2) 0.2 单位修约 0.2 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.2 单位进行的修约。0.2 单位修约方法如下：将拟修约数值  $X$  乘以 5，按指定修约间隔对  $5X$  进行修约，所得数值（ $5X$  修约值）再除以 5。按 0.2 单位修约到百位数示例如表 1-12 所示。

表 1-12 按 0.2 单位修约到百位数示例

拟修约数值 $X$	$5X$	$5X$ 修约值	$X$ 修约值
830	4150	4200	840
842	4210	4200	840
832	4160	4200	840
-930	-4650	-4600	-920

### 1.3.3 极限数值的表示和判定

#### 1. 书写极限数值的一般原则

1) 规定考核的以数量形式给出的指标或参数等，应当规定极限数值。极限数值表示符合要求的数值范围的界限值，它通过给出最小极限值和（或）最大极限值，或给出基本数值与极限偏差值等方式表达。

2) 极限数值的表示形式及书写位数应适当，其有效数字应全部写出。书写位数表示的精确程度，应能保证产品或其他对象应有的性能和质量。

#### 2. 表示极限数值的用语

1) 表达极限数值的基本用语及符号如表 1-13 所示。

表 1-13 表达极限数值的基本用语及符号

基本用语	符号	特定情形下的基本用语			注
大于 $A$	$>A$		多于 $A$	高于 $A$	测定值或计算值恰好为 $A$ 值时不符合要求
小于 $A$	$<A$		少于 $A$	低于 $A$	测定值或计算值恰好为 $A$ 值时不符合要求
大于或等于 $A$	$\geq A$	不小于 $A$	不少于 $A$	不低于 $A$	测定值或计算值恰好为 $A$ 值时符合要求
小于或等于 $A$	$\leq A$	不大于 $A$	不多于 $A$	不高于 $A$	测定值或计算值恰好为 $A$ 值时符合要求

注： $A$  为极限数值。

2) 基本用语可以组合使用, 表示极限值范围。

对特定的考核指标  $X$ , 允许采用如表 1-14 所示的用语和符号, 同一技术文件中一般只应使用一种符号表示方式。

表 1-14 对于特定的考核指标  $X$  允许采用的表达极限数值的组合用语及符号

组合基本用语	组合允许用语	符 号		
		表示方式 I	表示方式 II	表示方式 III
大于或等于 $A$ 且小于或等于 $B$	从 $A$ 到 $B$	$A \leq X \leq B$	$A \leq \cdot \leq B$	$A \sim B$
大于 $A$ 且小于或等于 $B$	超过 $A$ 到 $B$	$A < X \leq B$	$A < \cdot \leq B$	$>A \sim B$
大于或等于 $A$ 且小于 $B$	至少 $A$ 不足 $B$	$A \leq X < B$	$A \leq \cdot < B$	$A \sim < B$
大于 $A$ 且小于 $B$	超过 $A$ 不足 $B$	$A < X < B$	$A < \cdot < B$	

3) 基本数值  $A$  带有绝对极限上偏差值  $+b_1$  和绝对极限下偏差值  $-b_2$ , 指从  $A - b_2$  到  $A + b_1$ , 符合要求, 记为  $A_{-b_2}^{+b_1}$ 。当  $b_1 = b_2 = b$  时,  $A_{-b}^{+b}$  可简记为  $A \pm b$ 。

4) 基本数值  $A$  带有相对极限上偏差值  $+b_1\%$  和相对极限下偏差值  $-b_2\%$ , 指实测值或其计算值  $R$  对于  $A$  的相对偏差值  $[(R - A)/A]$  从  $-b_2\%$  到  $+b_1\%$  符合要求, 记为  $A_{-b_2}^{+b_1}\%$ 。当  $b_1 = b_2 = b$  时,  $A_{-b}^{+b}\%$  可记为  $A(1 \pm b\%)$ 。

5) 对基本数值  $A$ , 若极限上偏差值  $+b_1$  和 (或) 极限下偏差值  $-b_2$  使得  $A + b_1$  和 (或)  $A - b_2$  不符合要求, 则应附加括号, 写成  $A_{-b_2}^{+b_1}$  (不含  $b_1$  和  $b_2$ ) 或  $A_{-b_2}^{+b_1}$  (不含  $b_1$ )、 $A_{-b_2}^{+b_1}$  (不含  $b_2$ )。

### 3. 测定值或其计算值与规定的极限数值作比较的方法

在判定测定值或其计算值是否符合要求时, 应将测试所得的测定值或其计算值与规定的极限数值作比较, 比较的方法可采用全数值比较法或修约值比较法。

当有关文件中对极限数值 (包括带有极限偏差值的数值) 无特殊规定时, 均应使用全数值比较法。如规定采用修约值比较法, 应加以说明。若规定了使用其中一种比较方法时, 一经确定, 不得改动。

(1) 全数值比较法 将测试所得的测定值或计算值不经修约处理 (或虽经修约处理, 但应标明它是经舍、进或未进未舍而得), 用该数值与规定的极限数值作比较, 只要超出极限数值规定的范围 (不论超出程度大小), 都判定为不符合要求。示例如表 1-15 所示。

(2) 修约值比较法 将测定值或其计算值进行修约, 修约数位应与规定的极限数值数位一致。

1) 当测试或计算精度允许时, 应先将获得的数值按指定的修约数位多一位或几位报出, 然后按规定修约至规定的数位。

2) 将修约后的数值与规定的极限数值进行比较, 只要超出极限数值规定的范围 (不论超出程度大小), 都判定为不符合要求。示例如表 1-15 所示。

表 1-15 全数值比较法和修约值比较法的示例和比较

项目	极限数值	测定值或其计算值	按全数值比较是否符合要求	修约值	按修约值比较是否符合要求
中碳钢抗拉强度/ (N/mm <sup>2</sup> )	≥14 × 100	1349	不符合	13 × 100	不符合
		1351	不符合	14 × 100	符合
		1400	符合	14 × 100	符合
		1402	符合	14 × 100	符合
NaOH 的质量分数 (%)	≥97.0	97.01	符合	97.0	符合
		97.00	符合	97.0	符合
		96.96	不符合	97.0	符合
		96.94	不符合	96.9	不符合
中碳钢的硅的 质量分数(%)	≤0.5	0.452	符合	0.5	符合
		0.500	符合	0.5	符合
		0.549	不符合	0.5	符合
		0.551	不符合	0.6	不符合
中碳钢的锰的 质量分数(%)	1.2 ~ 1.6	1.151	不符合	1.2	符合
		1.200	符合	1.2	符合
		1.649	不符合	1.6	符合
		1.651	不符合	1.7	不符合
盘条直径/mm	10.0 ± 0.1	9.89	不符合	9.9	符合
		9.85	不符合	9.8	不符合
		10.10	符合	10.1	符合
		10.16	不符合	10.2	不符合
盘条直径/mm	10.0 ± 0.1 (不含 0.1)	9.94	符合	9.9	不符合
		9.96	符合	10.0	符合
		10.06	符合	10.1	不符合
		10.05	符合	10.0	符合
盘条直径/mm	10.0 ± 0.1 (不含 +0.1)	9.94	符合	9.9	符合
		9.86	不符合	9.9	符合
		10.06	符合	10.1	不符合
		10.05	符合	10.0	符合



(续)

项目	极限数值	测定值或其计算值	按全数值比较是否符合要求	修约值	按修约值比较是否符合要求
盘条直径/mm	10.0 ± 0.1 (不含 -0.1)	9.94	符合	9.9	不符合
		9.86	不符合	9.9	不符合
		10.06	符合	10.1	符合
		10.05	符合	10.0	符合

注：表中的示例并不表明这类极限数值都应采用全数值比较法或修约值比较法。

(3) 两种判定方法的比较 对测定值或其计算值与规定的极限数值，在不同情形用全数值比较法和修约值比较法的示例和比较如表 1-15 所示。对同样的极限数值，若它本身符合要求，则全数值比较法比修约值比较法相对较严格。

1.4 试验数据的处理和误差分析

1.4.1 误差的定义和分类

1. 误差的定义

一个物体的尺寸或质量、一种材料的抗拉强度或弹性模量等都存在一个客观真正的值，称为真值。在对各种物理量进行测量时，得到的结果称为实测值。误差就定义为实测值与真值之差，其式为

$$\varepsilon = x - x_0$$

式中  $\varepsilon$  是误差， $x$  和  $x_0$  分别是实测值和真值。

1) 在测量中，如果  $x_0$  代表某一物体的真实长度， $x$  代表某一次的实测值，则  $\varepsilon = x - x_0$  就表示测量误差。由于真值  $x_0$  是未知的，在经过多次测量后，便可得到测量值的算术平均值  $\bar{x}$ ，用  $\bar{x}$  代替  $x_0$ ，便可得  $\nu = x - \bar{x}$ ，称  $\nu$  为测量的偏差（或离差）。有时，可用对偏差的分析来代替对误差的分析。

2) 在生产上，产品的某项技术参数往往给定一个标称值，这时将其作为真值  $x_0$ 。误差  $\varepsilon = x - x_0$  就表示某一实测值与标称值之差。

3) 在计算中，某物体的运动速度为  $(100 \pm 0.1) \text{ m/s}$ ，其中  $100 \text{ m/s}$  代表真值  $x_0$ ，而  $\pm 0.1 \text{ m/s}$  表示误差，称它为计算误差。

2. 真值和平均值

由于测量仪器、测量方法、环境、人的观察能力等条件的限制，真值往往是无法测得的。但当测量的次数不断增加时，根据随机的正误差和负误差出现的概率相等并抵消的原理，在没有系统误差的条件下，平均值会趋近于真值。基于这种思

想,用平均值(即子样的平均值)来估计和推断真值(在一定的置信度下),并在条件许可的情况下,尽量增加测量次数。

(1) 算术平均值 设一组观测值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $n$  是观测次数,则算术平均值  $\bar{x}$  定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

假设观测值  $x_i$  服从正态分布,则可证明,在一组等精度的测量中算术平均值为最佳值。

(2) 均方根平均值 这种方法来源于计算分子的平均动能,后推广用于误差的计算中,其定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

(3) 加权平均值 如对同一物理量用不同方法测定,或由不同的人员测定,则在计算平均值中常常对比较可靠的数据予以加权,然后再平均,称加权平均,其定义为

$$\bar{x} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  表示一组观测值;  $w_1, w_2, \dots, w_n$  对应于各观测值的加权数。

(4) 中位值 将一组观测值按从小到大(或从大到小)的次序排列,则处在最中间位置的值就称为中位值。如果观测次数  $n$  为奇数,则排列在中间的那个数就是中位值。如果  $n$  为偶数,则中位值就是位于中间两个数的平均值。中位值的最大优点是求法简单,且与两端数据的变化无关,在数理统计中应用很广。

(5) 几何平均值 一组  $n$  个观测值连乘,然后再开  $n$  次方得到的值称为几何平均值,其公式为

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$$

上式两边取对数,则

$$\lg \bar{x} = \frac{1}{n} [\lg x_1 + \lg x_2 + \dots + \lg x_n] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i$$

上式说明,一组观测值取对数后的算术平均值,它的反对数就是这组观测值的几何平均值。

### 3. 误差的分类

在测量中,无论所用的仪器多么精密,方法多么完善,试验者多么细心,所得结果往往也不尽相同。在生产中,尽管工艺和加工方法均一致,最后产品的尺寸、

质量或其他技术参数也会存在差异。在计算中, 计算工具的精度不同或计算方法不同也会带来不同的舍弃误差。

误差可按不同的方法分类。按误差的绝对值和相对值, 误差可分为绝对误差和相对误差; 按误差的性质及其产生原因, 误差可分为系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差 指在重复测量中, 其值恒定不变或遵循一定规律变化的一类误差, 又称为确定性误差或恒定误差。系统误差的来源主要有工具误差、装置误差、人身误差、外界误差和方法误差。

1) 工具误差指由测量工具、仪器等产生的误差, 又称为仪差。它是由于测量工具或仪器不完善而产生的, 例如刻度不准、砝码未校正等。

2) 装置误差指由于测量设备和仪器的电路、安装、布置和调整不恰当而造成的误差。

3) 人身误差 (个人误差或人差) 指由于测量人员的感觉器官不完善而引起, 例如某人在读数时视线总是偏向一边, 从而造成读数误差, 这种误差往往因人而异。

4) 外界误差 (环境误差) 指由于周围环境如温度、气压、湿度和电磁场等的影响而产生的误差。

5) 方法误差 (理论误差) 指由于测量方法本身所依据的理论、模型不完善所带来的误差。

系统误差的出现是有规律的, 其产生的原因是可知的和能够找到的。对试验中所用的测量工具、仪器的精度进行鉴定, 便可降低系统误差。对于不能消除的系统误差, 要设法估计出其数值大小, 以便进行修正。

(2) 偶然误差 (随机误差) 在消除了系统误差或降低系统误差至一定范围 (例如拉力机载荷精度控制在  $\pm 0.5\%$ ) 后, 对同一对象进行反复测量时, 结果也会出现差异, 这时产生的误差称为偶然误差。

偶然误差的特点是时大时小, 时正时负, 其产生原因是多方面的、不确知的, 因而也是无法控制的。在同样条件下, 对同一个物理量作重复测定, 若测量次数足够多, 则可发现偶然误差完全服从统计性规律。当测量次数无限增大时, 偶然误差的算术平均值将趋近于零, 因此多次测量结果的算术平均值将接近于真值。

### 1.4.2 直接测定量的误差表示法

通过测量能直接得到结果的量, 称为直接测量量, 如人的高度和质量、拉伸试样的载荷和伸长量等。通过几个量的测量后要经过计算才能得到的量, 称间接测量量, 如物质的密度、材料的抗拉强度和断裂韧性等。

#### 1. 误差的分布规律

在不致引起误会的情况下常把偶然误差简称为误差。误差的特点如下:

- 1) 绝对值相等的正误差和负误差, 其出现的概率相同。
- 2) 绝对值小的误差出现的概率大, 而绝对值大的误差出现的概率小。
- 3) 绝对值很大的误差出现的概率接近于零, 即误差有一定的极限。
- 4) 当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时, 误差的算术平均值趋近于零, 这是由于正负误差互相抵消的结果。

## 2. 误差的表示方法

(1) 范围误差 范围误差是指一组测量值中最大值与最小值之差, 表示误差的变化范围。例如, 对某钢材进行拉伸试验得到 10 个抗拉强度  $R_m$  (单位为  $N/mm^2$ ) 的数据为 745、750、751、759、763、766、770、781、784、785, 则其范围误差为  $(785 - 745) N/mm^2 = 40 N/mm^2$ 。范围误差的优点是直观、简便, 缺点是只取决于一组测量值的两个极端值, 而与测量次数无关, 与中间数据的大小无关, 这显然与偶然误差和测量次数有关这一事实相违背。

(2) 算术平均误差 是表示误差的较好方法, 其定义为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

式中  $\delta$  是算术平均误差;  $x_i$  是第  $i$  个观测值;  $\bar{x}$  是  $n$  个观测值的算术平均值;  $|x_i - \bar{x}|$  是偏差的绝对值。因为偏差有正有负, 所以取绝对值加以平均。以上面 10 个  $R_m$  数据为例, 其中  $\bar{x} = 765.4 N/mm^2$  计算得到  $\delta = 11.8 N/mm^2$ 。算术平均误差的优点是比范围误差精细, 考虑了每一个  $|x_i - \bar{x}|$ ; 其缺点是无法鉴别两组测量值间的偏差大小。例如有两组测量值, 尽管其  $\delta$  可相等, 但其偏差  $(x_i - \bar{x})$  可以很分散。

(3) 标准误差 也称均方根误差, 其计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

在观测次数  $n$  较小时, 标准误差常表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

标准误差  $\sigma$  是各观测值  $x_i$  的函数, 且对  $x_i$  的大小比较敏感, 所以是表示精密度的一个较好的指标, 已广泛用于误差分析中。

### 1.4.3 力学性能试验数据处理举例

#### 1. 可疑观测值的取舍

处理力学性能试验结果时, 特别是处理疲劳寿命试验结果时, 常常会发现在一组数据中, 某一观测值特别偏高或特别偏低, 使人产生怀疑, 称之为可疑观测值。

对可疑观测值的取舍,不能采取随意的态度,而应科学严格地加以分析判别,然后决定取舍。

对可疑观测值的分析和判别,可从物理本质方面进行分析和从概率的观点进行数学处理。例如,对偏低的疲劳寿命,要检查试样的断口是否有夹杂、气孔,在疲劳源附近是否有表面划伤、锈蚀或加工刀痕等,试验过程中试验机是否产生了横振,鼓轮的跳动量是否超差等。经过分析,确系上述诸因素之一引起该试样寿命值偏低,才能作出取舍的决定。

从物理本质方面进行详细的分析而仍然不得要领时,可疑观测值的取舍可用数学判别的方法。这种判别方法的基础是在同一试验条件下,取得过大或过小的观测值,均属于小概率事件。根据实际推断原理,小概率事件在一次试验中几乎是不可能出现的,从而建立起取舍的判别准则。

(1) 拉依达准则 在相同条件下测得一组观测值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 计算出均值  $\bar{x}$  和标准差  $\sigma$  为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} = \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] / (n-1) \right\}^{1/2}$$

如果  $x_i$  为可疑观测值,则计算偏差  $v_i = x_i - \bar{x}$ 。如果  $|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma$ , 则舍去  $x_i$ , 否则保留  $x_i$ 。上式又称为  $3\sigma$  准则。例如已知某物体的温度经 15 次测量,其值如表 1-16 所示,求决定  $x_8 = 20.30^\circ\text{C}$  的取舍。

表 1-16 测量结果及处理

$i$	$x_i/^\circ\text{C}$	$y_i = x_i - 20.4^\circ\text{C}$	$y_i^2$	$i$	$x_i/^\circ\text{C}$	$y_i = x_i - 20.4^\circ\text{C}$	$y_i^2$
1	20.42	0.02	0.0004	11	20.42	0.02	0.0004
2	20.43	0.03	0.0009	12	20.41	0.01	0.0001
3	20.40	0.00	0.00	13	20.39	-0.01	0.0001
4	20.43	0.03	0.0009	14	20.39	-0.01	0.0001
5	20.42	0.02	0.0004	15	20.40	0.00	0.00
6	20.43	0.03	0.0009	15 个值的计算	总和	0.06	0.0152
7	20.39	-0.01	0.0001		平均值	0.004	
8	20.30	-0.10	0.0100	去掉第 8 个值后其 余 14 个值的计算	总和	0.16	0.0052
9	20.40	0.00	0.00		平均值	0.011	
10	20.43	0.03	0.0009				

将 15 次测量的结果  $x_i$  及  $y_i = x_i - 20.4^\circ\text{C}$  和  $y_i^2$  均列于表 1-16。在计算  $x_i$  的标准



差时, 由于  $x_i$  的数值太大, 可用  $y_i = x_i - b$  代替, 这样由于  $y_i - \bar{y} = x_i - \bar{x} = v_i$ , 所以  $y_i$  的  $\sigma$  和  $x_i$  的  $\sigma$  是一样的, 上例中,  $y_i$  的  $\sigma$  为

$$\begin{aligned}\sigma &= \left\{ \left[ \sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2 \right] / (n-1) \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \left[ 0.0152 - \frac{1}{15} \times 0.06^2 \right] / 14 \right\}^{1/2} = 0.033\end{aligned}$$

于是  $3\sigma = 3 \times 0.033 = 0.099$ , 偏差绝对值  $|v_i| = |x_8 - 20.404| = |-0.104| > 0.099$ , 所以应该舍去  $x_8 = 20.30^\circ\text{C}$  这个观测值。去掉  $x_8$  后, 剩下的 14 个数据, 作第二次计算, 得  $\sigma = 0.016$ ,  $3\sigma = 0.048$ , 偏差  $|x_i - 20.411|$  均小于  $3\sigma = 0.048$ , 均属有效。

## (2) 肖维奈准则

该准则是根据正态分布原理得到的。在一组测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中, 当可疑值  $x_i$  小于下限  $a$  或大于上限  $b$  时, 则可舍去  $x_i$ 。而  $a$  和  $b$  两个点是根据小概率  $1/2n$  来确定的。例如, 设  $n=11$ , 则  $1/2n=4.55\%$ ,  $a$  点以下和  $b$  点以上的正态曲线所包围的面积均为  $4.55\%$  的一半即  $2.28\%$ , 如图 1-28 所示。查标准正态分布表,

即可得  $\frac{x_i - \bar{x}}{S}$  的限度, 列于表 1-17 中。对于一组观测值中的某一可疑值  $x_i$ , 只要其

计算的绝对值  $\left| \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right|$  超过相应的限值, 则应舍去之, 否则就应保留它。

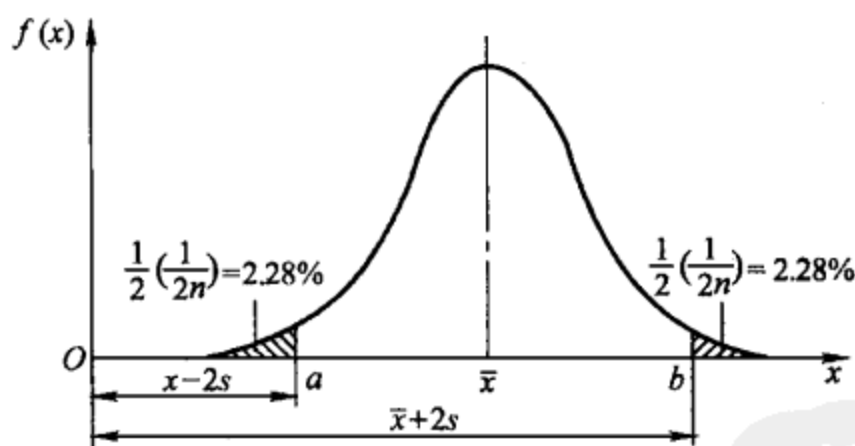


图 1-28 肖维奈准则示意

上例中根据  $n=15$ , 查表 1-17 得限值  $\left| \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right| = 2.13$ 。  $2.13 \times 0.033 = 0.07$ ,

$|x_8 - \bar{x}| = |20.30 - 20.404| = |-0.104| = 0.104 > 0.07$ , 所以舍去  $x_8$ , 进一步计算: 根据  $n=14$ , 查表得限值为 2.10, 则  $2.10 \times 0.016 = 0.034$ , 舍去  $x_8$  后, 其余  $x_i$  的偏差绝对值均未超过 0.034, 故均予以保留。



表 1-17 肖维奈准则中的限值

子样大小 $n$	$\left  \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right $	子样大小 $n$	$\left  \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right $	子样大小 $n$	$\left  \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right $
3	1.38	13	2.07	23	2.30
4	1.53	14	2.10	24	2.31
5	1.65	15	2.13	25	2.33
6	1.73	16	2.15	30	2.39
7	1.80	17	2.17	40	2.49
8	1.86	18	2.20	50	2.58
9	1.92	19	2.22	75	2.71
10	1.96	20	2.24	100	2.81
11	2.00	21	2.26	200	3.02
12	2.03	22	2.28	500	3.20

2. 对比试验结果的统计处理

力学性能试验往往会涉及到两种工艺、两种配方和两种设计方案的比较，这时就要作对比试验。例如，将欲对比的两组试样（一组经过喷丸处理，另一组未经喷丸处理），在同一加载条件下进行疲劳试验，根据疲劳寿命（或强度）的观测值，判别其疲劳性能是否相同，或其中的一组优于另一组。

由于疲劳试验结果的分散性，即使完全相同的两组试样，在同一台试验机及同一加载条件下进行试验，也会发现这两组试验数据的平均值和标准差存在着一定差异。当然，这种差异是由偶然误差所引起的，因此这种差异是不显著的。如果这两组试样是来源于两种材料，或一种材料的两种热处理，或两种不同的喷丸工艺等，这时两组试验结果的差异中，不仅包含了偶然误差，而且还包含了系统误差。这就要求对比试验结果的统计处理方法，能鉴别出这两组试验结果之间的差异是显著的（存在系统误差），还是不显著的（仅仅存在偶然误差）。

在对比试验中，有时关心的是两组试样平均值之间的差异，但有时也对两组试样的分散性（标准差）感兴趣，因此，对比试验结果的统计处理方法必须提供对母体平均值作假设检验和对母体标准差作假设检验的不同方法。

## 第2章 金属材料的拉伸性能

### 2.1 拉伸性能相关知识

#### 2.1.1 拉伸性能及拉伸试验的定义

材料的弹性、强度、塑性、应变硬化和韧性等许多重要的力学性能指标统称为拉伸性能，它是材料的基本力学性能。根据拉伸性能可预测材料的其他力学性能，如疲劳、断裂等。在工程应用中，拉伸性能是结构静强度设计的主要依据。

拉伸试验是标准拉伸试样在静态轴向拉伸力不断作用下以规定的拉伸速度拉至断裂，并在拉伸过程中连续记录力与伸长量，从而求出其强度判据和塑性判据的力学性能试验。

#### 2.1.2 拉伸试验常用术语

- (1) 标距 测量伸长用的试样圆柱或棱柱部分的长度。
- (2) 原始标距 ( $L_0$ ) 施力前的试样标距。
- (3) 断后标距 ( $L_u$ ) 试样断裂后，将断口对接在一起时，试样的标距长度。
- (4) 平行长度 ( $L_c$ ) 试样两头部或两夹持部分（不带头试样）之间平行部分的长度。

- (5) 伸长量 试验期间任一时刻原始标距 ( $L_0$ ) 的增量。

- (6) 伸长率 原始标距的伸长量与原始标距 ( $L_0$ ) 比值的百分率。

- (7) 断后伸长率 ( $A$ ) 断后标距的残余伸长 ( $L_u - L_0$ ) 与原始标距 ( $L_0$ ) 之比的百分率，如图 2-1 所示。对于比例试样，若原始标距不为  $5.65 \sqrt{S_0}$  ( $S_0$  为平行长度的原始横截面积)，符号  $A$  应附以下标说明所使用的比例系数，例如  $A_{11.3}$  表示原始标距 ( $L_0$ ) 为  $11.3 \sqrt{S_0}$  的断后伸长率。对于非比例试样，符号  $A$  应附以下标说明所

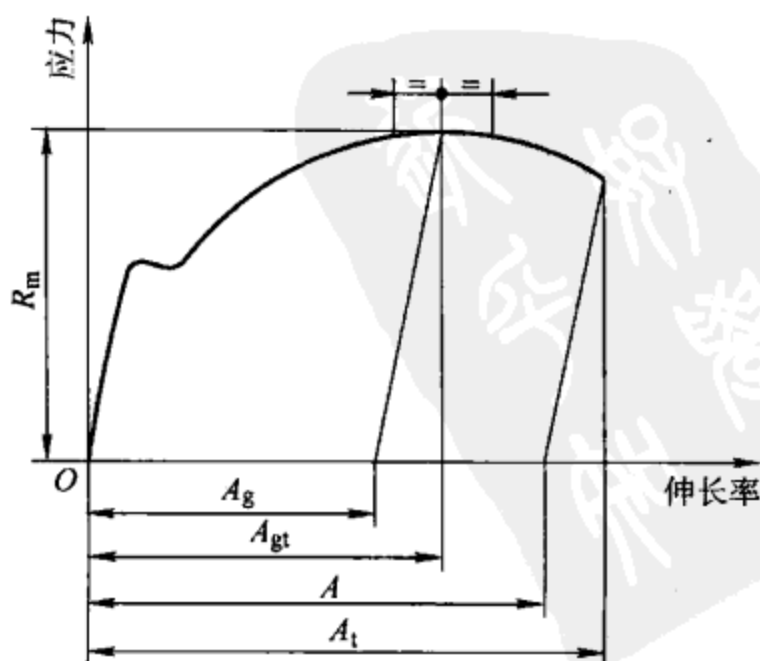


图 2-1 拉伸的定义

使用的原始标距，以毫米（mm）表示，例如  $A_{80\text{mm}}$  表示原始标距（ $L_0$ ）为 80mm 的断后伸长率。

（8）断裂总伸长率（ $A_t$ ） 试样断裂时刻原始标距的总伸长（弹性伸长加塑性伸长）与原始标距（ $L_0$ ）之比的百分率，如图 2-1 所示。

（9）最大力伸长率 试样拉至最大力下时，原始标距的伸长（弹性伸长加塑性伸长）与原始标距（ $L_0$ ）之比的百分率，应区分最大力总伸长率（ $A_{gt}$ ）和最大力非比例伸长率（ $A_g$ ），如图 2-1 所示。

（10）引伸计标距（ $L_e$ ） 用引伸计测量试样延伸时所使用试样平行长度部分的长度。测定屈服强度和规定强度性能时推荐  $L_e \geq L_0/2$ 。测定屈服点延伸率和最大力时或在最大力之后的性能，推荐  $L_e$  等于  $L_0$  或近似等于  $L_u$ 。

（11）屈服点延伸率（ $A_e$ ） 呈现明显屈服（不连续屈服）现象的金属材料，屈服开始至均匀加工硬化开始之间引伸计标距的延伸与引伸计标距（ $L_e$ ）之比的百分率。

（12）断面收缩率（ $Z$ ） 试样断裂后，缩颈处横截面积的最大缩减量（ $S_0 - S_u$ ）与原始横截面积（ $S_0$ ）比值的百分率。

（13）最大力（ $F_m$ ） 试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大力。对于无明显屈服（连续屈服）的金属材料，为试验期间的最大力。

（14）应力 试验期间任一时刻的力除以试样原始横截面积（ $S_0$ ）之商。

（15）抗拉强度（ $R_m$ ） 相应最大力（ $F_m$ ）的应力。

（16）屈服强度 当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，应区分上屈服强度和下屈服强度。

（17）上屈服强度（ $R_{eH}$ ） 试样发生屈服而力首次下降前的最高应力，如图 2-2 所示。

（18）下屈服强度（ $R_{eL}$ ） 在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最低应力，如图 2-2 所示。

（19）规定非比例延伸强度（ $R_p$ ） 试样标距部分的非比例延长达到规定的原始标距百分率时的应力，如图 2-3 所示。使用的符号应附以下标说明所规定的百分率，例如， $R_{p0.2}$  表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

（20）规定总延伸强度（ $R_t$ ） 试样标距部分的总伸长（弹性伸长加塑性伸长）到达规定的原始标距百分率时的应力，如图 2-4 所示。使用的符号应附以下标说明所规定的百分率，例如， $R_{t0.5}$  表示规定总延伸率为 0.5% 时的应力。

（21）规定残余延伸强度（ $R_r$ ） 试样卸除拉伸力后，其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分率时的应力，如图 2-5 所示。使用的符号应附以下标说明所规定的百分率，例如， $R_{r0.2}$  表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

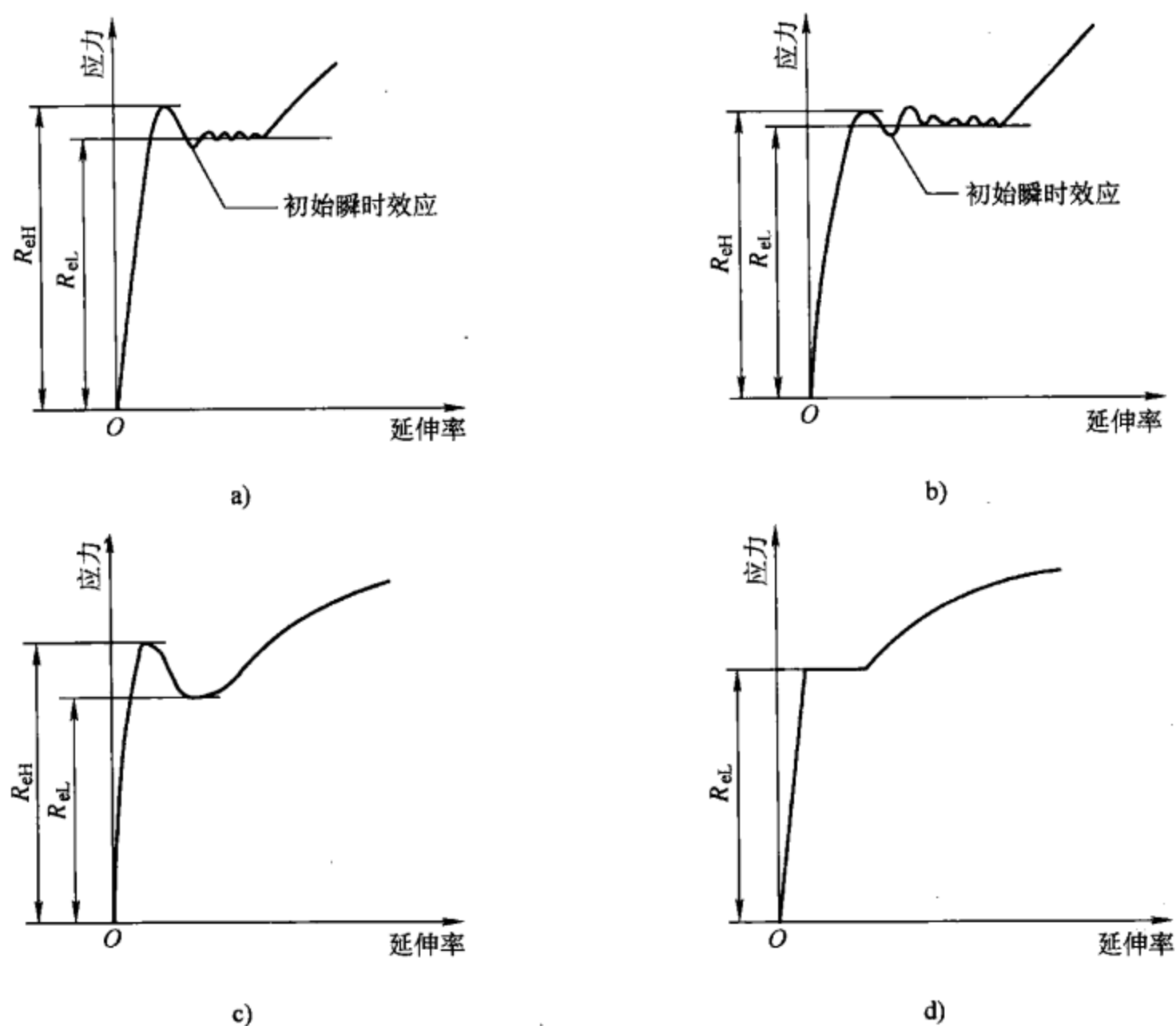


图 2-2 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度 ( $R_{eH}$  和  $R_{eL}$ )

a) I类 b) II类 c) III类 d) IV类

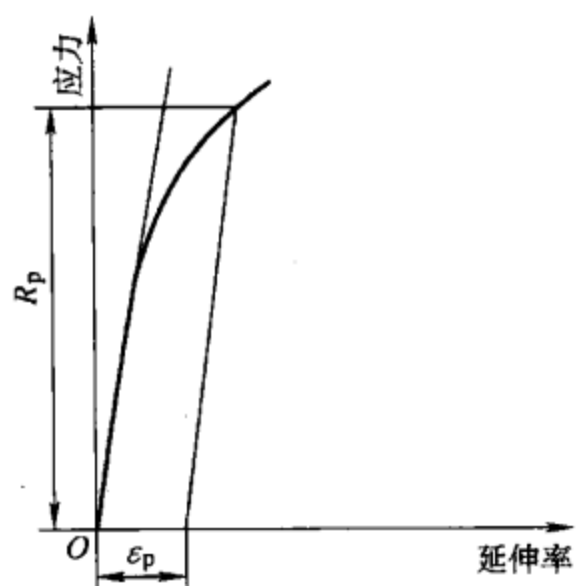


图 2-3 规定非比例延伸强度 ( $R_p$ )

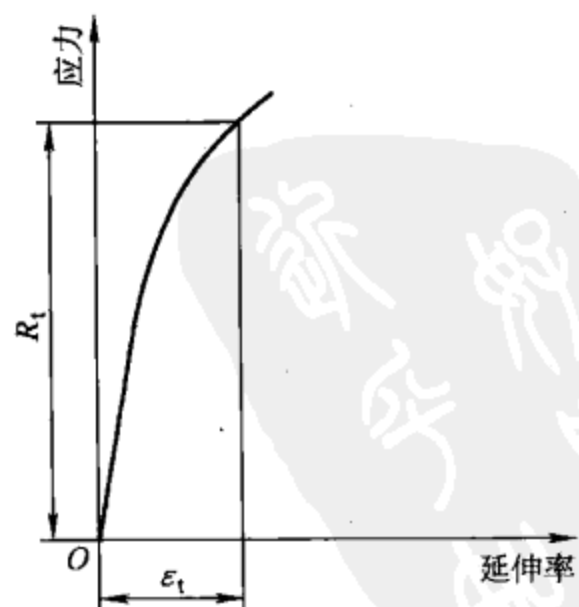


图 2-4 规定总延伸强度 ( $R_t$ )

(22) 轴向引伸计标距 ( $L_{el}$ ) 测量试样轴向变形的引伸计标距。

(23) 横向引伸计标距 ( $L_{et}$ ) 测量试样横向变形的引伸计标距。

(24) 轴向应变 ( $e_l$ ) 在平面内平行于试样轴向方向的线应变。

(25) 横向应变 ( $e_t$ ) 在平面内垂直于试样轴向方向的线应变。

(26) 拉伸杨氏模量 ( $E_l$ ) 弹性变形范围内, 轴向拉应力与轴向应变成线性比例关系范围内的轴向拉应力与轴向应变的比值。

(27) 弦线模量 ( $E_{ch}$ ) 在弹性范围内轴向应力-轴向应变曲线上任两规定点之间的斜率。

(28) 切线模量 ( $E_{tan}$ ) 在弹性范围内轴向应力-轴向应变曲线上任一规定应力或应变值处的斜率。

(29) 泊松比 ( $\mu$ ) 在均匀分布的轴向应力作用下横向应变与轴向应变之比的绝对值。

(30) 拉伸应变硬化指数 ( $n$ ) 在单轴拉伸应力作用下, 真实应力 ( $s$ ) 与真实塑性应变 ( $e$ ) 数学方程式中的真实塑性应变指数。此方程可用式  $s = Ce^n$  表示 ( $C$  为强度系数), 可以转化为对数方程  $\ln s = \ln C + n \ln e$ , 在双对数坐标平面内的直线斜率即为拉伸应变硬化指数。

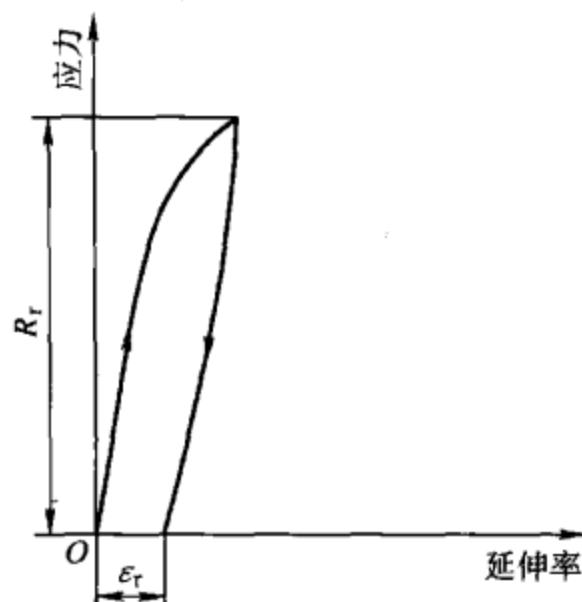


图 2-5 规定残余延伸强度 ( $R_t$ )

## 2.2 拉伸试样的制备

### 2.2.1 试样的一般要求

拉伸试样是指样坯经过机加工或不经机加工而提供拉伸试验用的一定尺寸的样品。试样的形状与尺寸取决于试样材料的形状及其用途, 以便于安装引伸计和形成轴向均匀应力状态等原则来确定。通常从产品、压制坯或铸锭切取样坯经机加工制成试样。但具有恒定横截面的产品 (型材、棒材、线材等) 和铸造试样 (铸铁和铸造非铁合金) 可以不经机加工而进行试验。试样横截面可以为圆形、矩形、多边形、环形, 特殊情况下可以为某些其他形状。

试样原始标距 ( $L_0$ ) 与原始横截面积 ( $S_0$ ) 有  $L_0 = k \sqrt{S_0}$  关系者称为比例试样, 国际上使用的比例系数  $k$  的值为 5.65。原始标距应不小于 15mm。当试样横截面积太小, 以致采用比例系数  $k$  为 5.65 的值不能符合这一最小标距要求时, 可以采用较高的值 (优先采用 11.3 的值) 或采用非比例试样。非比例试样其原始标距  $L_0$  与其原始横截面积  $S_0$  无关, 而是根据制品的尺寸和材质给以规定的平行长度和

标距长度。

2.2.2 厚度在 0.1 ~ <3mm 范围内的薄板和薄带使用的试样

1. 试样的形状

试样的夹持头部一般应比其平行长度部分宽，试样头部与平行长度之间应有过渡半径  $r$  至少为 20mm 的过渡弧相连接，如图 2-6 所示。头部宽度应至少为 20mm，但不超过 40mm。通过协议，也可以使用不带头试样，对于这类试样，两夹头间的自由长度应等于  $L_0 + 3b$ 。对于宽度等于或小于 20mm 的产品，试样宽度可以相同于产品的宽度。

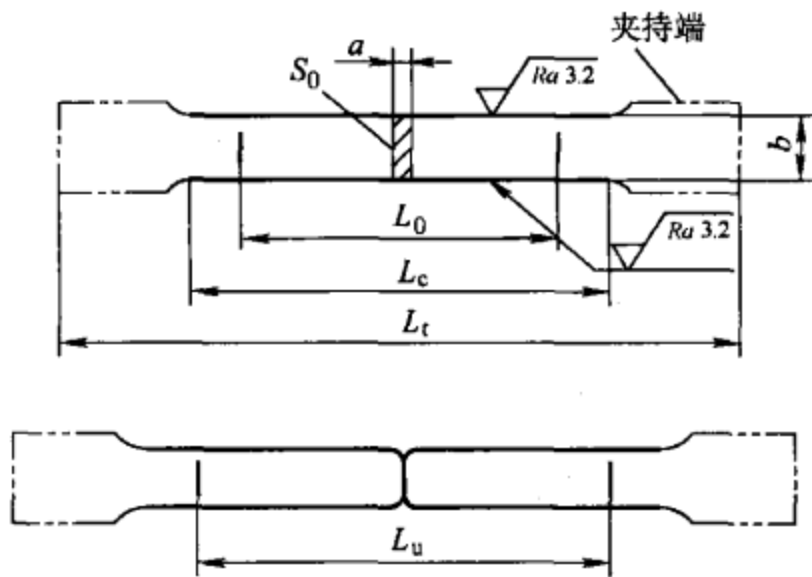


图 2-6 机加工的矩形横截面试样（试样头部仅为示意性）

2. 试样的尺寸

- 1) 平行长度应不小于  $L_0 + b/2$ 。
- 2) 对于宽度等于或小于 20mm 的不带头试样，原始标距等于 50mm。
- 3) 矩形横截面比例试样和矩形横截面非比例试样尺寸如表 2-1 和表 2-2 所示。

表 2-1 矩形横截面比例试样尺寸

$b/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$k = 5.65$				$k = 11.3$			
		$L_0/\text{mm}$	$L_c/\text{mm}$		试样 编号	$L_0/\text{mm}$	$L_c/\text{mm}$		试样 编号
			带头	不带头			带头	不带头	
10	$\geq 20$	$5.65 \sqrt{S_0}$ $\geq 15$	$\geq L_0 + b/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2b$	$L_0 + 3b$	P1	$11.3 \sqrt{S_0}$ $\geq 15$	$\geq L_0 + b/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2b$	$L_0 + 3b$	P01
12.5					P2				P02
15					P3				P03
20					P4				P04

注：1. 优先采用比例系数  $k = 5.65$  的比例试样。若比例标距小于 15mm，建议采用表 2-2 的非比例试样。  
2. 如需要，厚度小于 0.5mm 的试样在其平行长度上可以带小凸耳以便于装夹引伸计。上、下两凸耳宽度中心线间的距离为原始标距。



表 2-2 矩形横截面非比例试样尺寸

$b/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$L_0/\text{mm}$	$L_e/\text{mm}$		试样编号
			带头	不带头	
12.5	$\geq 20$	50	75	87.5	P5
20		80	120	140	P6

注：如需要，厚度小于 0.5mm 的试样在其平行长度上可带小凸耳以便于装夹引伸计。上、下两凸耳宽度中心线间的距离为原始标距。

3. 尺寸公差和形状公差

机加工试样的尺寸公差和形状公差应符合表 2-3 的要求。

表 2-3 试样的尺寸公差和形状公差 (单位：mm)

试样标称宽度	尺寸公差	形状公差	
		一般试验	仲裁试验
10	$\pm 0.2$	0.1	0.04
12.5			
15			
20	$\pm 0.5$	0.2	0.05

2.2.3 厚度 $\geq 3\text{mm}$ 的板材和扁材及直径或厚度 $\geq 4\text{mm}$ 的线材、棒材和型材使用的试样

1. 试样的形状

通常试样要进行机加工。平行长度和夹持头部之间应以过渡弧连接，试样头部形状应适合于试验机夹头的夹持，如图 2-7 所示。圆形横截面试样的夹持端和平行长度之间的过渡弧的半径应不小于  $0.75d$ ，矩形横截面试样的夹持端和平行长度之

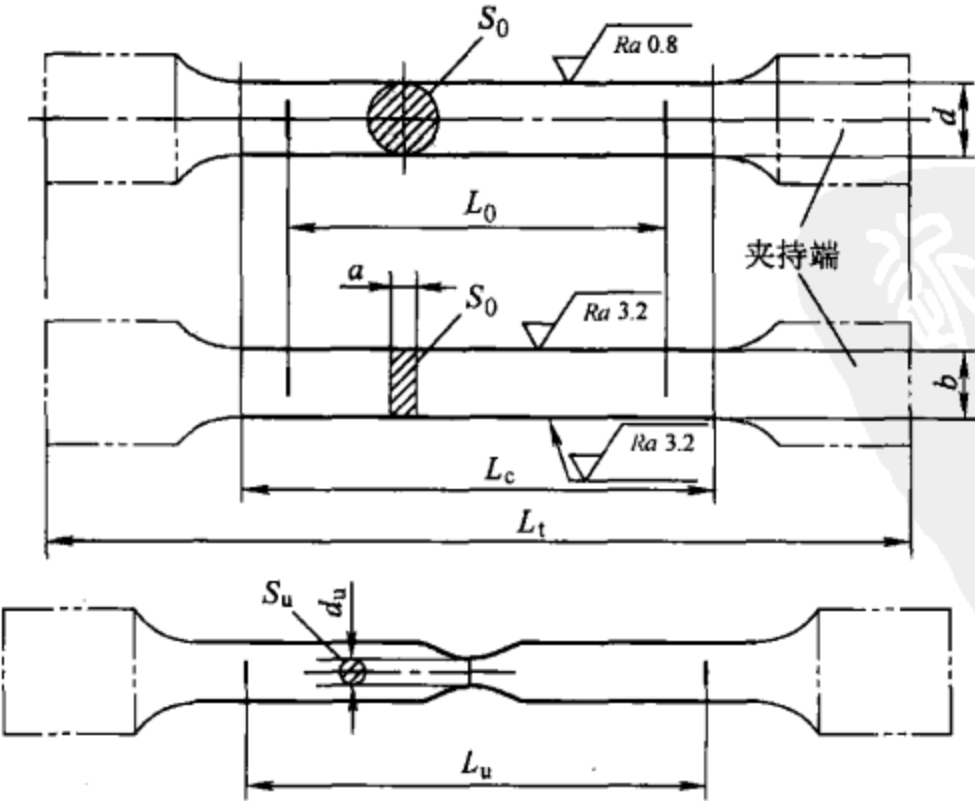


图 2-7 第二类试样

间的过渡弧的半径应不小于 12mm。矩形横截面试样的宽厚比不超过 8:1。机加工的圆形横截面试样其平行长度的直径一般应不小于 3mm。

2. 试样的尺寸

1) 圆形横截面比例试样的尺寸如表 2-4 所示。在  $L_0$  大于 15mm 的前提下，应优先采用  $L_0 = 5d$  的短比例试样；否则，选用  $L_0 = 10d$  的长比例试样，若有需要，也可采用定标距试样。

表 2-4 圆形横截面比例试样的尺寸

$d/mm$	$r/mm$	$k = 5.65$			$k = 11.3$		
		$L_0/mm$	$L_c/mm$	试样编号	$L_0/mm$	$L_c/mm$	试样编号
25	$\geq 0.75d$	$5d$	$\geq L_0 + d/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2d$	R1	$10d$	$\geq L_0 + d/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2d$	R01
20				R2			R02
15				R3			R03
10				R4			R04
8				R5			R05
6				R6			R06
5				R7			R07
3				R8			R08

注：1. 如相关产品标准无具体规定，优先采用 R2、R4 或 R7 试样。

2. 试样总长度取决于夹持方法，原则上  $L_t > L_c + 4d$ 。

2) 矩形横截面比例试样的尺寸如表 2-5 所示。

表 2-5 板材矩形横截面试样比例试样的尺寸

$b/mm$	$r/mm$	$k = 5.65$			$k = 11.3$		
		$L_0/mm$	$L_c/mm$	试样编号	$L_0/mm$	$L_c/mm$	试样编号
12.5	$\geq 12$	$5.65 \sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5 \sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2 \sqrt{S_0}$	P7	$11.3 \sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5 \sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2 \sqrt{S_0}$	P07
15				P8			P08
20				P9			P09
25				P10			P010
30				P11			P011

注：如相关产品标准无具体规定，优先采用比例系数  $k = 5.65$  的比例试样。

3) 矩形横截面非比例试样的尺寸如表 2-6 所示。

表 2-6 矩形横截面试样非比例试样的尺寸

$b/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$L_0/\text{mm}$	$L_c/\text{mm}$	试样编号
12.5	$\geq 12$	50	$\geq L_0 + 1.5 \sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2 \sqrt{S_0}$	P12
20		80		P13
25		50		P14
38		50		P15
40		200		P16

4) 试样横向尺寸公差如表 2-7 所示。

表 2-7 试样横向尺寸公差 (单位: mm)

名 称	标称横向尺寸	尺寸公差	形状公差
机加工的圆形横截面直径	3	$\pm 0.05$	0.02
	$>3 \sim 6$	$\pm 0.06$	0.03
	$>6 \sim 10$	$\pm 0.07$	0.04
	$>10 \sim 18$	$\pm 0.09$	0.04
	$>18 \sim 30$	$\pm 0.10$	0.05
四面机加工的矩形横截面试样横向尺寸	相同于圆形横截面试样直径的公差		
相对两面机加工的矩形横截面试样横向尺寸	3	$\pm 0.1$	0.05
	$>3 \sim 6$		
	$>6 \sim 10$	$\pm 0.2$	0.1
	$>10 \sim 18$		
	$>18 \sim 30$	$\pm 0.5$	0.2
	$>30 \sim 50$		

2.2.4 直径或厚度 <4mm 的线材、棒材和型材使用的试样

1. 试样的形状

试样通常为产品的一部分, 不经过机加工, 如图 2-8 所示。

2. 试样的尺寸

通常采用非比例试样, 如表 2-8 所示。

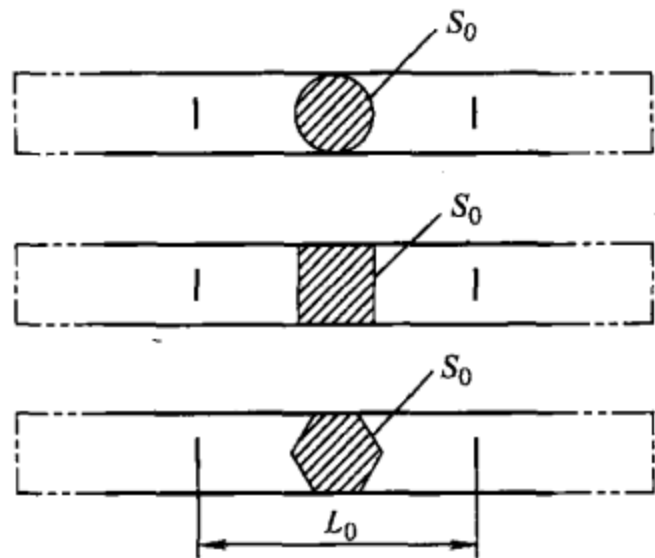


图 2-8 第三类试样（试样头部形状仅为示意性）

表 2-8 第三类试样的尺寸

$d$ 或 $a$ /mm	$L_0$ /mm	$L_c$ /mm
$\leq 4$	100	$\geq 150$
	200	$\geq 250$

2.2.5 管材使用的试样

1. 试样的形状

试样可以为全壁厚纵向弧形试样（见图 2-9）、管段试样（见图 2-10）、全壁厚横向试样或从管壁厚度机加工的圆形横截面试样。

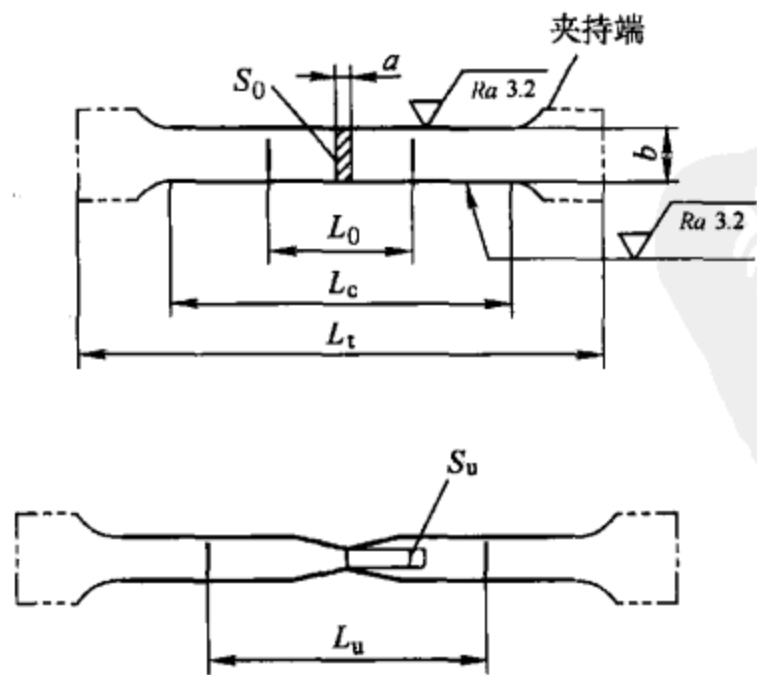


图 2-9 管的纵向弧形试样（试样头部形状仅为示意性）

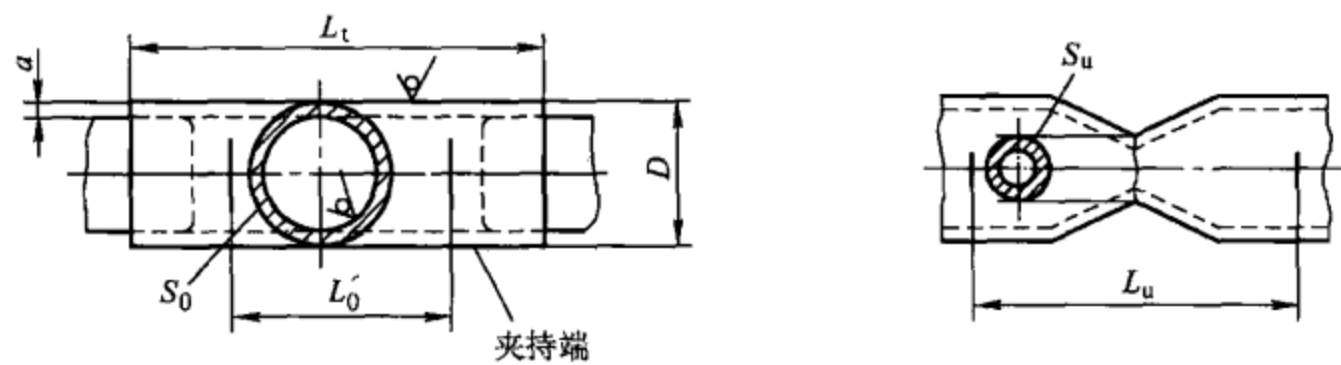


图 2-10 管段试样

2. 试样的尺寸

1) 纵向弧形试样一般适用于管壁厚度大于 0.5mm 的管材，其尺寸如表 2-9 所示。

表 2-9 纵向弧形试样的尺寸

D/mm	b/mm	a/mm	r/mm	k = 5.65			k = 11.3		
				L <sub>0</sub> /mm	L <sub>c</sub> /mm	试样 编号	L <sub>0</sub> /mm	L <sub>c</sub> /mm	试样 编号
30 ~ 50	10	原壁厚	≥12	5.65√S <sub>0</sub>	≥L <sub>0</sub> + 1.5 √S <sub>0</sub> 仲裁试验: L <sub>0</sub> + 2 √S <sub>0</sub>	S1	11.3√S <sub>0</sub>	≥L <sub>0</sub> + 1.5 √S <sub>0</sub>	S01
> 50 ~ 70	15					S2		仲裁试验:	S02
> 70	20					S3		L <sub>0</sub> + 2 √S <sub>0</sub>	S03
≤100	19			50		S4			
> 100 ~ 200	25					S5			
> 200	38					S6			

注：采用比例试样时，优先采用比例系数 k = 5.65 的比例试样。

2) 管段试样的尺寸如表 2-10 所示。

表 2-10 管段试样的尺寸

L <sub>0</sub> /mm	L <sub>c</sub> /mm
5.65 √S <sub>0</sub>	≥L <sub>0</sub> + D/2 仲裁试验: L <sub>0</sub> + 2D
50	≥100

2.2.6 焊接接头使用的试样

1. 取样位置

试样应从焊接接头垂直于焊缝轴线方向截取，试样加工完成后，焊缝的轴线应位于试样平行长度部分的中间。对小直径管试样可采用整管，未作特殊规定时，小直径管是指外径不大于 18mm 的管子。

## 2. 热处理或时效

焊接接头或试样一般不进行热处理，但相关标准规定或允许焊接接头进行热处理除外，这时应在试验报告中详细记录热处理的参数。对于会产生自然时效的铝合金，应记录焊接至开始试验的间隔时间。钢铁类焊缝金属中有氢存在时，可能会对试验结果带来显著影响，需要采取适当的去氢处理。

## 3. 取样

(1) 钢 厚度超过 8mm 时，不能采用剪切方法。当采用热切割或可能影响切割面性能的其他切割方法从焊件或试件上截取试样时，应确保所有切割面距离试样的表面至少 8mm 以上。平行于焊件或试件的原始表面的切割，不应采用热切割方法。

(2) 其他金属材料 不得采用剪切方法和热切割方法，只能采用机械加工方法（如锯或铣、磨等）。

## 4. 位置

试样的厚度  $t_s$ ，一般应与焊接接头处母材的厚度  $t$  相等，如图 2-11a 所示。当相关标准要求进行全厚度（厚度超过 30mm）试验时，可从接头截取若干个试样覆盖整个厚度，如图 2-11b 所示。在这种情况下，试样相对接头厚度的位置应作记录。

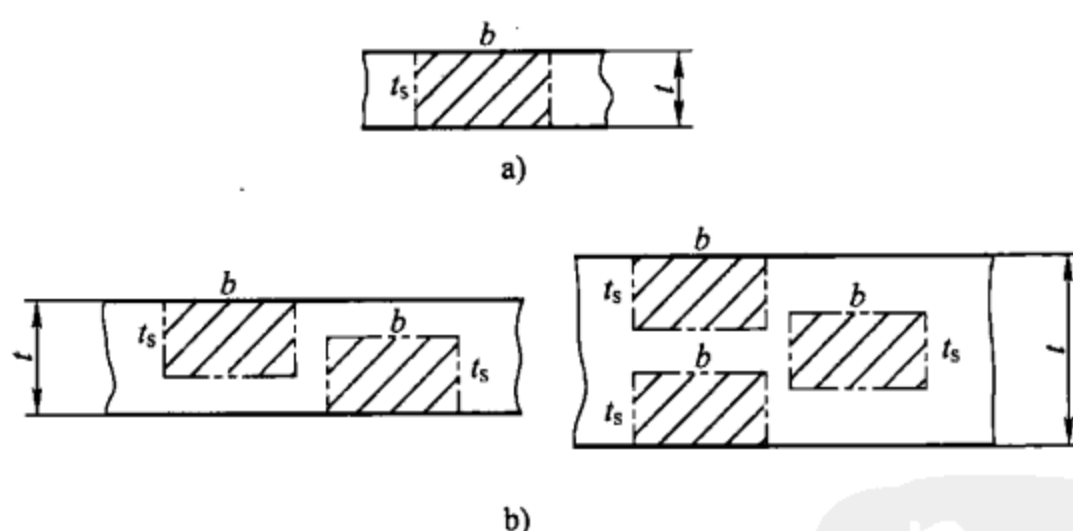


图 2-11 试样的位置示例

a) 全厚度试验 b) 多试样试验

注：试样可以相互搭接。

## 5. 尺寸

(1) 板及管板状试样 试样厚度沿着平行长度  $L_c$ 。对于从管接头截取的试样应均衡一致，其形状和尺寸应符合表 2-11 及图 2-12 的规定。对于从管接头截取的试样，可能需要校平夹持端；然而，这种变平及可能产生的厚度的变化不应波及平行长度  $L_c$ 。



表 2-11 板及管板状试样的尺寸 (单位: mm)

名 称		符号	尺寸
试样总长度		$L_t$	适合于所使用的试验机
夹持端宽度		$b_1$	$b + 12$
平行长度部分宽度	板	$b$	$12(t_s \leq 2)$
			$25(t_s > 2)$
	管子	$b$	$6(D \leq 50)$
			$12(50 < D \leq 168)$ $25(D > 168)$
平行长度		$L_c$	$\geq L_s + 60$
过渡弧半径		$r$	$\geq 25$

注: 1. 对于压焊及高能束焊接头而言, 焊缝宽度为零 ( $L_s = 0$ )。  
2. 对于某些金属材料 (如铝、铜及其合金) 可以要求  $L_c \geq L_s + 100\text{mm}$ 。

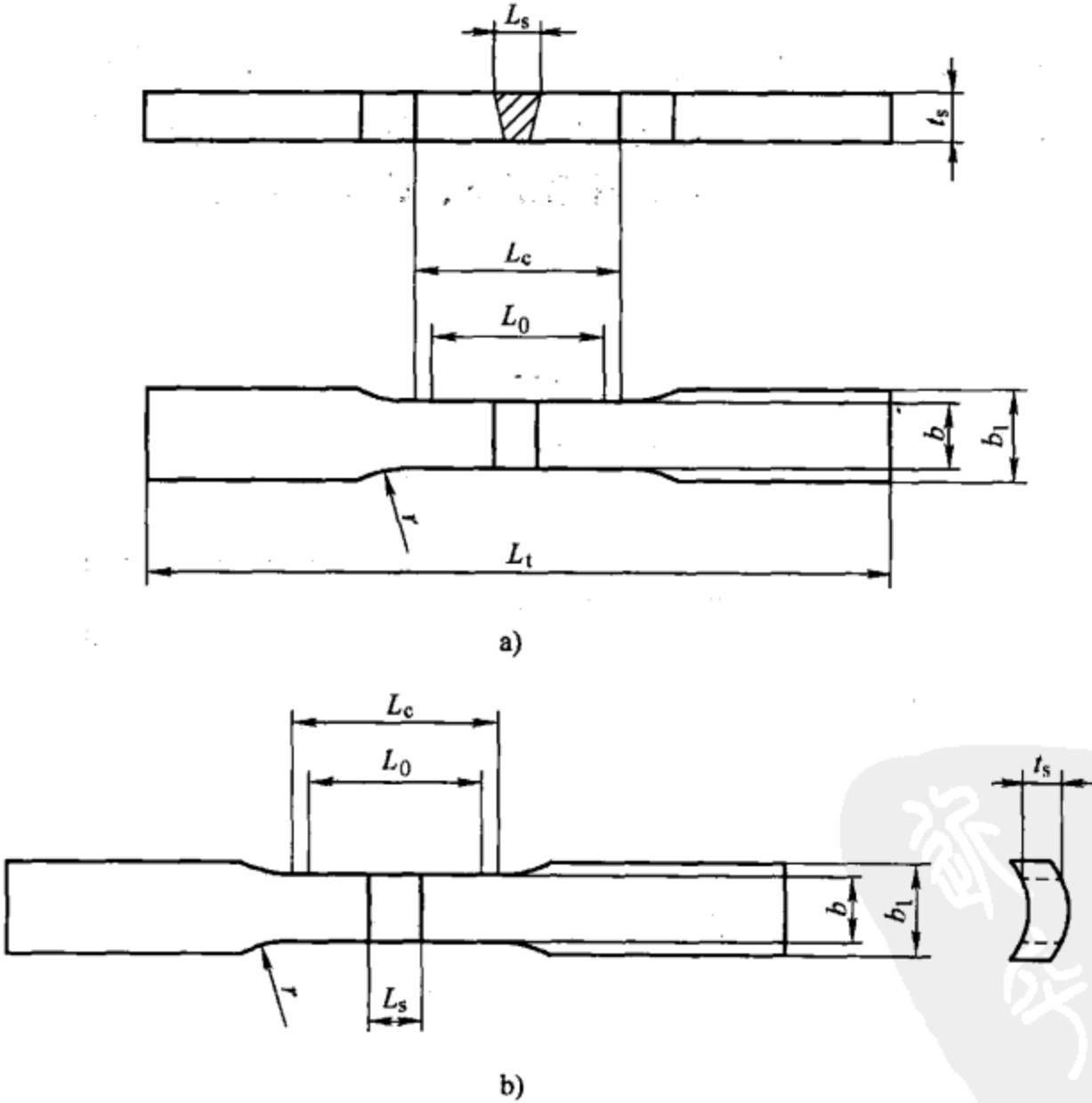


图 2-12 板和管接头板状试样  
a) 板接头 b) 管接头

(2) 整管试样 整管试样尺寸如图 2-13 所示。

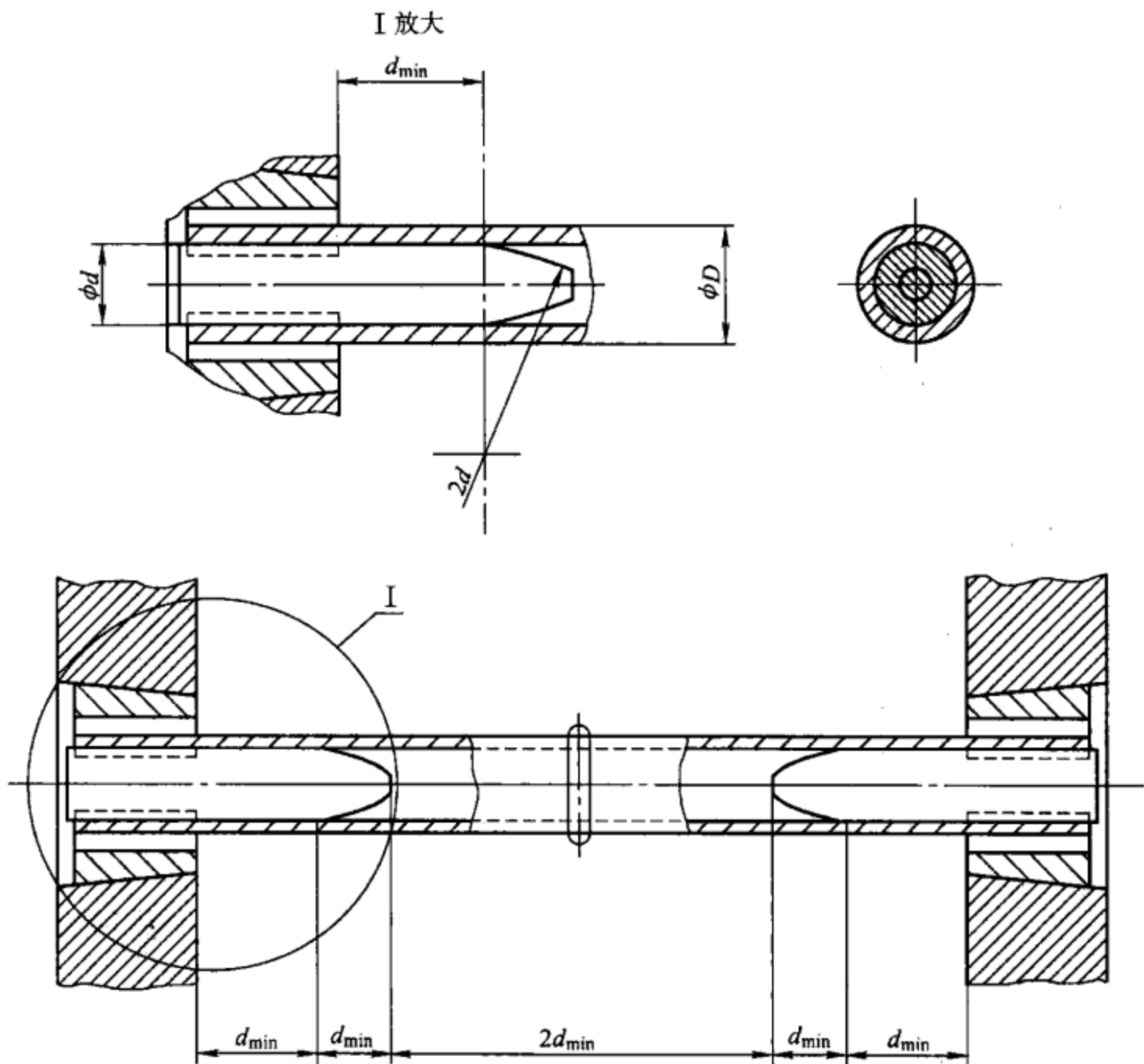


图 2-13 整管拉伸试样

6. 表面制备

试样制备的最后阶段要进行机加工，应采取预防措施避免在表面产生变形硬化或过热。试样表面应没有垂直于试样平行长度  $L_0$  方向的划痕或切痕，不得除去咬边。超出试样表面的焊缝金属应通过机加工除去，对于有熔透焊道的整管试样应保留管内焊缝。

2.2.7 焊缝及熔敷金属使用的试样

试样应从试件的焊缝及熔敷金属上纵向截取。加工完成后，试样的平行长度应全部由焊缝金属组成。为了确保试样在接头中的正确定位，试样两端的接头横截面可作宏观腐蚀。试样应取自焊缝金属的中心，如图 2-14、图 2-15 所示。未能在中间厚度位置截取试样时，应记录其中心距表面的距离  $t_1$ ，如图 2-15b 所示。在厚板

或双面焊接头情况下，可以在厚度方向不同位置截取若干试样，如图 2-15c 所示，应记录每个试样中心距表面的距离  $t_1$  和  $t_2$ 。

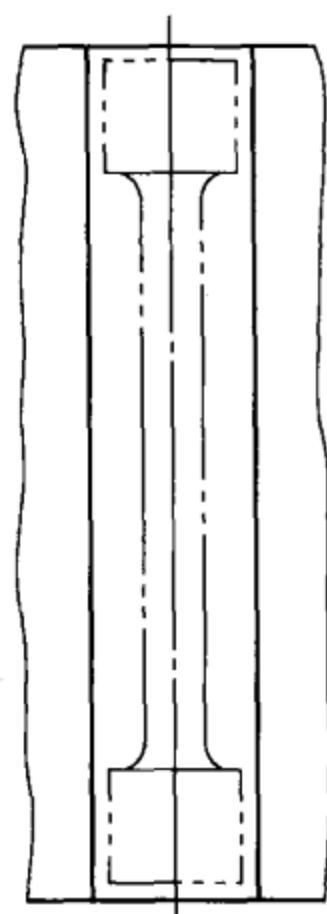


图 2-14 试样的位置示例（纵向截面）

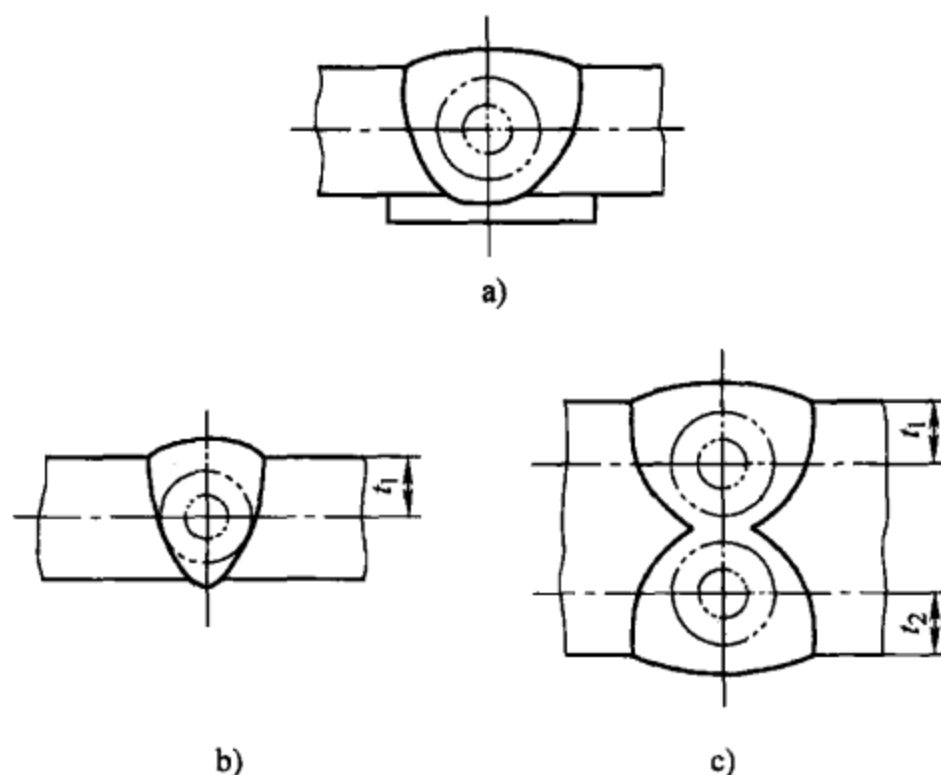


图 2-15 试样的位置示例（横向截面）

a) 用于焊接材料分类的熔敷金属试样

b) 取自单面焊接头的试样 c) 取自双面焊接头的试样

## 2.2.8 低温拉伸试样

低温拉伸试样如图 2-16 ~ 图 2-19 所示。

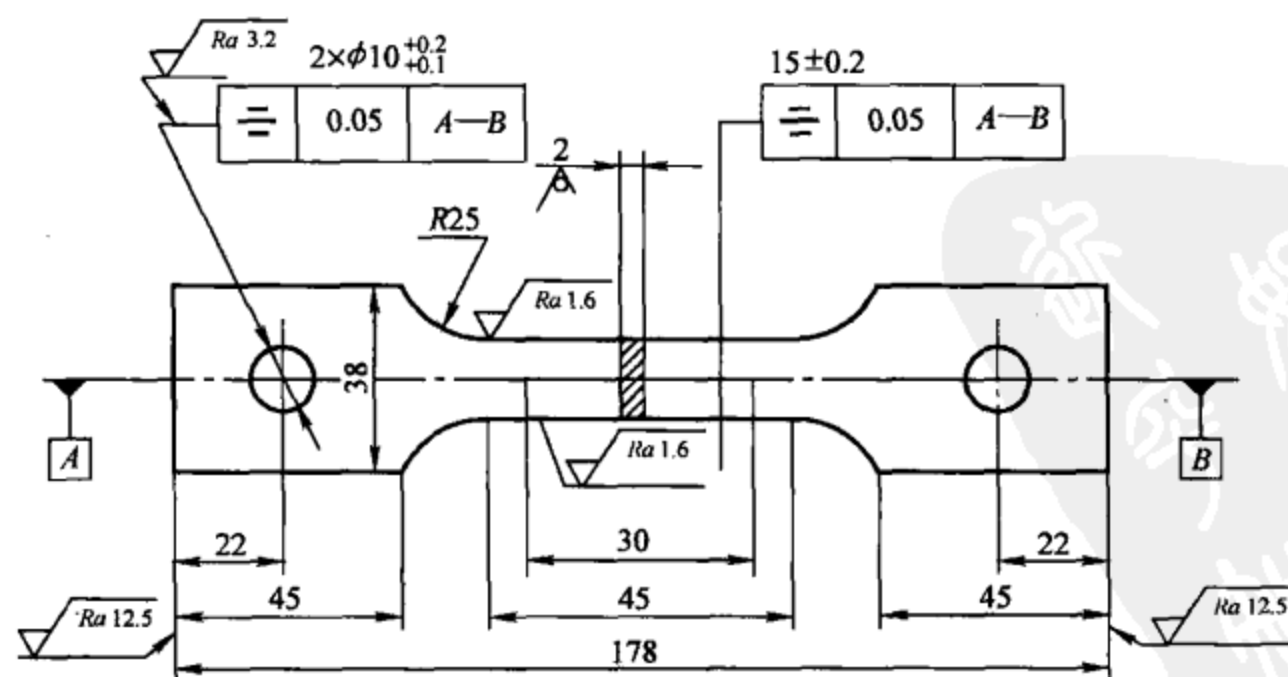


图 2-16 第 1 类低温拉伸试样

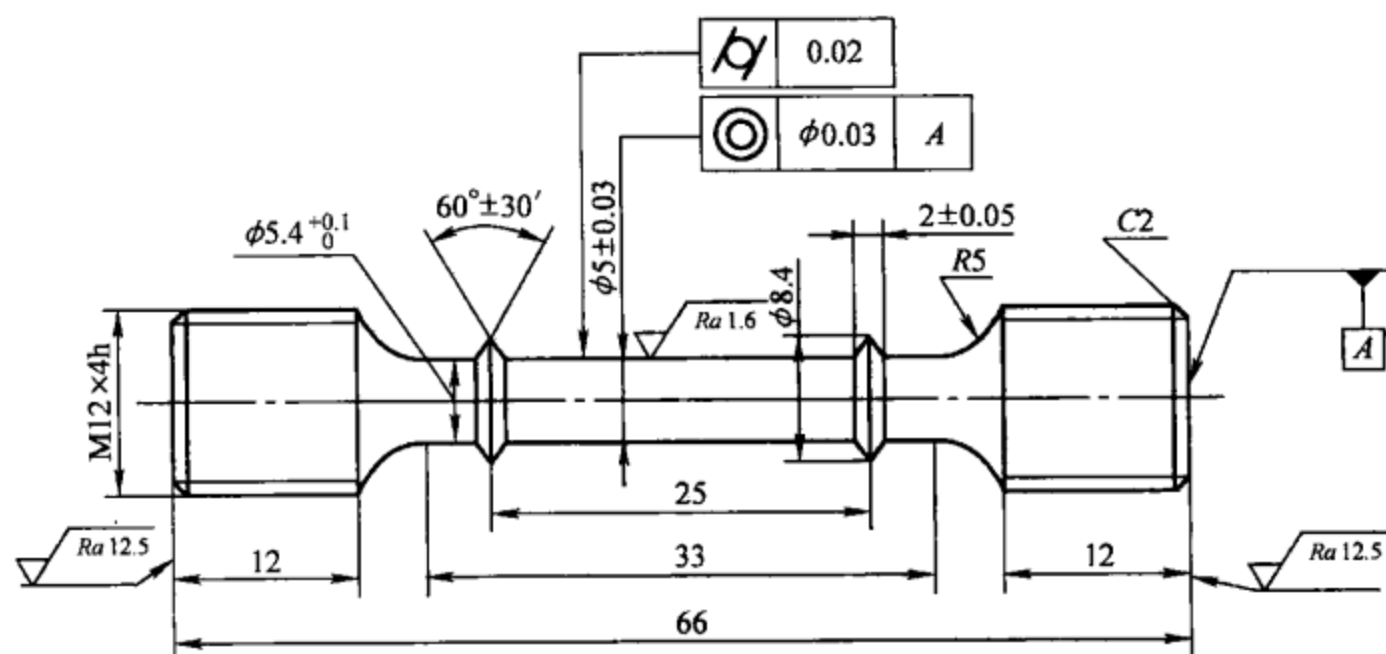


图 2-17 第 2 类低温拉伸试样

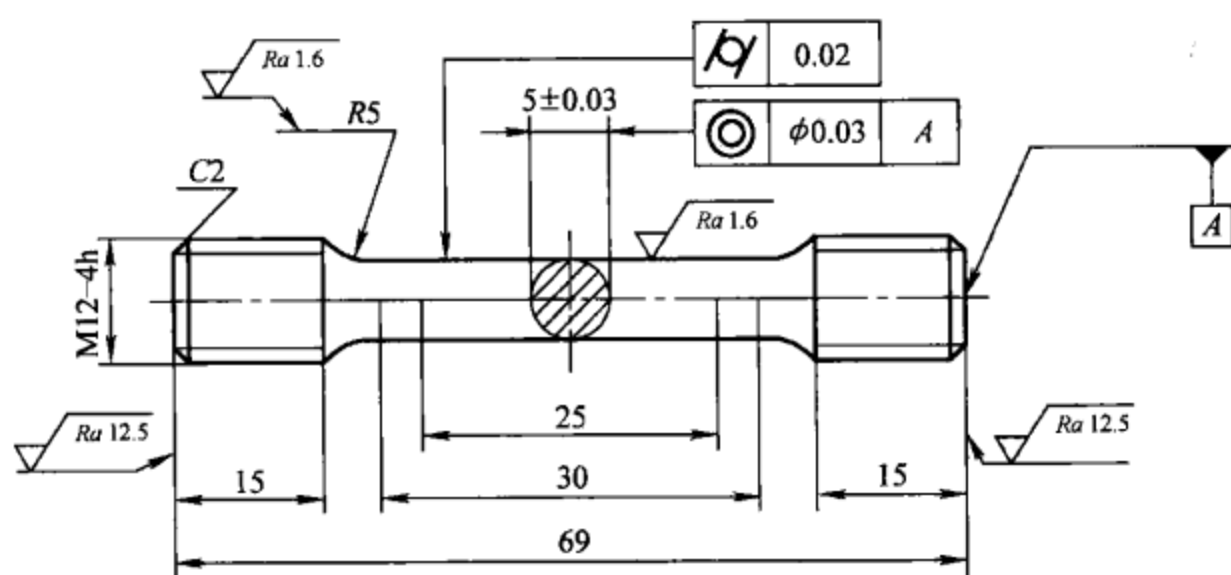


图 2-18 第 3 类低温拉伸试样

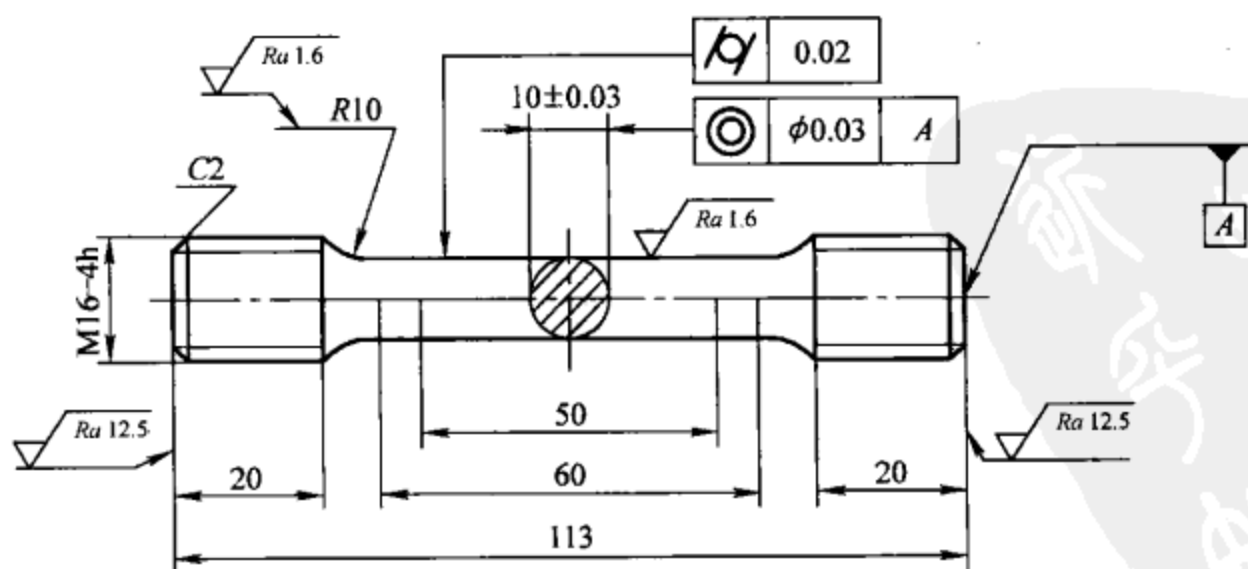


图 2-19 第 4 类低温拉伸试样

## 2.3 拉伸试验机及引伸计

在金属力学性能试验中,需要对试样施加载荷,这种加载用的设备称为材料试验机。

随着科学技术的不断发展和测试技术的日趋完善,新技术、新工艺和新材料的广泛应用,材料设计和研究对材料的力学性能指标测试精度要求更高了,出现了一些极为重要的新的试验方法。进入 21 世纪以后,由于材料科学发展很快,对材料试验机提出了更高的要求,例如要求拉伸机加载过程中控制应变速率和加载速率、宽范围的拉移速度及各种循环等。这些均为现代材料性能极为重要的参数,迫使人们去研究新型材料试验机以满足要求。新型电子万能试验机的问世,满足了这一要求。

### 2.3.1 电子万能试验机的结构原理

电子万能试验机结构原理如图 2-20 所示,它由测量系统、中横梁驱动系统及载荷机架三个部分组成。

#### 1. 测量系统

主要是用以检测材料的承受载荷大小、试样的变形量及中横梁位移多少等。

载荷测量是通过应变式载荷传感器及其放大器来实现的。电子万能试验机的特点之一是载荷测量范围宽。它一方面是通过更换不同量程的载荷传感器,另一方面是改变高性能载荷放大器的放大倍数来实现的。放大倍数一

般分为 1、2、5、10、20、50、100 等,前六档与不同量程的传感器配合实现整机载荷量程的覆盖,以满足全载荷试验量程的覆盖。以 100kN 机为例,只选用 4 只载荷传感器就可以达到全载荷试验量程的要求,如表 2-12 所示。100kN 载荷传感器载荷范围为 2 ~ 100kN; 2000N 载荷传感器载荷范围 40 ~ 2000N; 50N 载荷传感器载荷范围为 1 ~ 50N; 1N 载荷传感器载荷范围为 0.05 ~ 1N。这样就实现了 0.05 ~ 100000N 的全部试验载荷的覆盖。

电子载荷测量系统的特点是测量范围宽,精度高,响应快和操作方便。每次使用时,只要进行一次电气标定即可工作,传感器每年由计量部门检定一次。

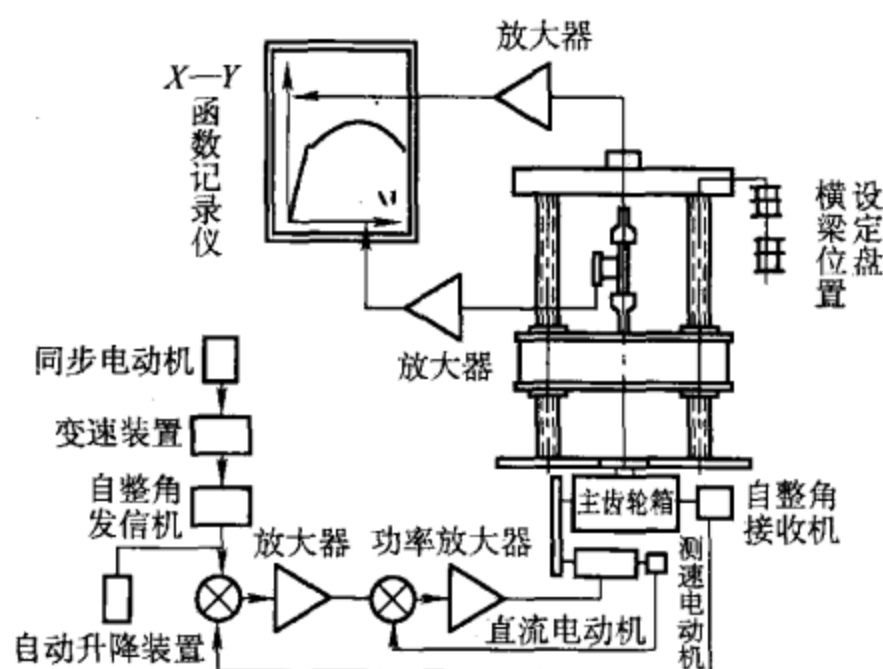


图 2-20 电子万能试验机结构原理图

表 2-12 力传感器容量与放大器档级的测量范围 (单位: N)

力传感器容量	载荷放大器档级					
	1	2	5	10	20	50
100000	0 ~ 100000	0 ~ 50000	0 ~ 20000	0 ~ 10000	0 ~ 5000	0 ~ 2000
2000	0 ~ 2000	0 ~ 1000	0 ~ 400	0 ~ 200	0 ~ 100	0 ~ 40
50	0 ~ 50	0 ~ 25	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 2.5	0 ~ 1
1	0 ~ 1	0 ~ 0.5	0 ~ 0.2	0 ~ 0.1	0 ~ 0.05	—

试样变形的测量是通过引伸计及放大器构成应变测量系统实现的。引伸计规格齐全,其夹具有适应圆试样的,有适应板材试样的,还有适应线材、丝材、片材试样的。标距种类也很多,一般分为 100mm、50mm、25mm、12.5mm 等。为了扩大使用范围,通常用改变放大器的放大倍数来实现。一般放大器的放大倍数可分为 1、2、5、10 及 20 五个档级,从而减少了引伸计的规格种类。

中横梁位移的测量方法很多,有的用横梁位移速度与 X-Y 记录仪走纸同步的办法测量,有的用挂线电位计法、胶带穿孔光电计数法等。最先进的是光电编码器与传动丝杠同轴测角法,这种方法不但能直接显示出横梁位移量的多少,还可通过 A/D 及 D/A 变换获得模拟量输出,从而用于试验数据处理。

## 2. 中横梁驱动系统

这一系统是由速度设定单元、伺服放大器、功率放大器、速度与位置检测器、直流伺服电动机以及传动机构组成。从图 2-20 中看出,由直流伺服电动机驱动主齿轮箱,带动丝杠使中横梁上下移动,结果实现了拉伸、压缩和各种循环试验。

速度设定单元主要是给出了与速度相对应的准确模拟电压值或数字量,要求精度高稳定可靠,并且范围宽,通常为 1:10000 (0.05 ~ 500mm/min), 1100 系列电子拉伸机速度范围最宽为 1:20000 (0.05 ~ 1000mm/min)。伺服放大器的作用实际上是一个将速度给定信号、速度检测信号、位置检测信号以及功率放大器的电流大小汇总在一起,按要求运算后发出指令去驱动功率放大器,进而使直流伺服电动机按预先给定速度转动。这一伺服控制系统有三个环路,即通常所说的速度、位置及电流反馈。采用了光电编码器之类的解析器作为检测元件的位置反馈系统是速度控制精度高的基本保证。

## 3. 载荷机架

从图 2-20 中看到,电子万能试验机的载荷机架包括上横梁、中横梁、台面和丝杠副。有的试验机(如 1185 型机),用两根圆柱与上横梁和台面构成框架,这两根圆柱作为中横梁上下运动的导向柱;也有的用槽钢与上横梁和台面构成框架,这样既保证了机架的刚度,又使机架结构匀称合理。传动载荷的一对丝杠,有的试验机选用梯形丝杠,有的则为了提高传动效率选用了滚珠丝杠,而且丝杠与中横梁



啮合处采用了消除结构，这样使试验机在进行全反复试验时，大大减少了载荷换向间隙，从而提高了传动精度。

### 2.3.2 试验机的技术要求

为了保证试验结果准确可靠，拉力试验机应满足如下要求：

- 1) 加力和卸力应平稳、无冲击和颤动。
- 2) 测力示值误差不大于  $\pm 1\%$ ，达到试验机检定的 1 级精度。
- 3) 在更换不同摆锤时，指针的变动不大于 0.1 个分度。
- 4) 试验保持时间不应少于 30s，在 30s 内力的示值变动范围应小于 0.4%。
- 5) 试验机及其夹持装置应保证试样轴向受力。

试验机的技术要求应由政府计量管理部门或使用单位的计量管理人员按有关规程检定。凡未经检定或检定不合格的试验机，严禁在生产及科研中使用。

### 2.3.3 引伸计的结构原理及选用

引伸计用于测量拉伸试样的微量变形，或者研究构件在外力作用下的线性变形所采用的仪器。引伸计一般由三部分组成。

- (1) 感受变形部分 用来直接与试样表面接触，以感受试样的变形。
- (2) 传递和放大部分 把所感受的变形加以放大的机构。
- (3) 指示部分 指示或记录变形大小的机构，有机械式和光学式的两种。

应变式位移传感器主要由粘贴有应变片的弹性元件组成。在小应变条件下，弹性元件上的应变与所受外力成正比，也与弹性元件的变形成正比。如果在弹性元件的合适部位粘贴上应变片，并接成电桥形式，则可将弹性元件所感受的变形转换成电参量输出，再通过放大、显示或记录仪器就可以把变形量显示或记录下来。这种传感器的特点是精度高、线性好、装卸方便，试样断裂时弹性元件能自动脱落，可用来测拉伸全曲线。

引伸计和位移传感器（包括记录仪或指示装置）根据其精度不同可分为 5 个等级，各等级精度要求如表 2-13 所示。对于不同试验项目应选用不同等级的引伸计或位移传感器。表 2-14 为拉伸试验时测定不同性能指标时应选用的引伸计或位移传感器的等级。

表 2-13 引伸计及位移传感器的等级标准

等级	标距的最大允许偏差(%)	应变示值的最大允许误差(%)	进回程示值的最大允许相对误差(%)
A	$\pm 0.25$	$\pm 0.1$	$\pm 0.3$
B	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$	$\pm 0.3$
C	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$

(续)

等级	标距的最大允许偏差(%)	应变示值的最大允许误差(%)	进回程示值的最大允许相对误差(%)
D	±1.0	±1.0	±0.5
E	±2.0	±2.0	±1.0
F	±3.0	±3.0	±2.0

表 2-14 拉伸试验引伸计或位移传感器等级的选用

测试项目	规定的伸长率(%)	允许使用的最低等级
$R_p、R_r$	≤0.05	B
	>0.05 ~ <0.2	C
	≥0.2	D
$R_t、R_{eH}、R_{eL}、A_e、A_{gt}、A_g$		D

2.4 试验要求

2.4.1 原始标距的标记

- 1) 应用两个或一系列小标记、细划线或细墨线标记原始标距，但所采用的方法不能影响试样过早断裂，不得用引起过早断裂的缺口作标记。
- 2) 对于比例试样，应将原始标距的计算值修约至最接近 5mm 的倍数，中间数值向较大一方修约。标距的标记应精确到取值数值的 ±1%。
- 3) 如平行长度比原始标距长许多，例如不经机加工的试样，可以标记一系列套叠的原始标距。有时可以在试样表面划一条平行于试样纵轴的线，并在此线上标记原始标距。

2.4.2 原始横截面积的测定

测量时按照表 2-15 选用量具或测量装置，根据测量的试样原始尺寸计算原始横截面积，并至少保留 4 位有效数字。

表 2-15 量具或测量装置的分辨力 (单位: mm)

试样横截面尺寸	分辨力≤	试样横截面尺寸	分辨力≤
0.1 ~ 0.5	0.001	>2.0 ~ 10.0	0.01
>0.5 ~ 2.0	0.005	>10.0	0.05

- 1) 圆形截面试样应在试样工作段的两端及中间处两个相互垂直的方向上各测一次直径，取其算术平均值，选用三处测得横截面积中的最小值，横截面积  $S_0 =$

$\pi d^2/4$ 。

2) 矩形截面试样应在工作段的两端及中间处测量其宽度和厚度, 选用三处测得横截面积的最小值, 横截面积  $S_0 = ab$ ,  $a$ 、 $b$  分别为矩形截面的长和宽。

3) 圆管纵向弧形试样应在试样工作段的两端及中间处测量, 选用三处测得横截面节中的最小值。有关标准或协议无规定时, 当  $b/D < 0.25$  时, 横截面积  $S_0 = ab \{1 + b^2 / [6D(D - 2a)]\}$ ; 当  $b/D < 0.17$  时, 横截面积  $S_0 = ab$ ; 计算时, 管外径  $D$  取标准值。

4) 圆管截面试样应在管的一端两个相互垂直的方向各测一次外径, 取其算术平均值。在同一管端圆周上相互垂直的方向测量四处管壁厚度, 取其算术平均值。用平均外径和平均管壁厚度计算得到的横截面积作为标距内的原始横截面积, 原始横截面积  $S_0 = \pi a(D - a)$ ,  $a$  为管材壁厚。

5) 未经加工的等截面试样, 其横截面积  $S_0$  可以根据测得的试样长度, 质量和材料密度计算。长度  $L_t$ 、质量  $m$  的测量精度应达到  $\pm 0.5\%$ , 密度  $\rho$  至少取 3 位有效数字。横截面积  $S_0 = m/(\rho L_t)$ 。

### 2.4.3 试验设备的准确度

试验机应按照 GB/T 16825.1—2008《静力单轴试验机的检验 第1部分: 拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准》和 GB/T 16825.2—2005《静力单轴试验机的检验 第2部分: 拉力蠕变试验机 施加力的检验》进行检验, 并应为 1 级或优于 1 级准确度, 根据试样选取合适的夹持装置和试验机合适的量程。

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160—2002《单轴试验用引伸计的标定》的要求。测定上屈服强度、下屈服强度、屈服点延伸率、规定非比例延伸强度、规定总延伸强度、规定残余延伸强度和规定残余延伸强度的验证试验, 应使用不劣于 1 级准确度的引伸计。测定其他具有较大延伸率的性能, 例如抗拉强度、最大力延伸率和最大力非比例延伸率、断裂总伸长率, 以及断后伸长率, 应使用不劣于 2 级准确度的引伸计, 引伸计的标距长度应不小于试验所要求标距的 1/2。

### 2.4.4 试验速率

1) 试验机夹头的分离速率应尽可能保持恒定, 并在表 2-16 规定的应力速率的范围内。

表 2-16 应力速率

材料弹性模量 $E/(\text{N/mm}^2)$	应力速率/ $[(\text{N/mm}^2)/\text{s}]$	
	最小	最大
$< 150000$	2	20
$\geq 150000$	6	60

- 2) 若仅测定下屈服强度,应优先采用应变控制速率,在试样平行长度的屈服期间应变速率在  $0.00025 \sim 0.0025\text{s}^{-1}$  之间。平行长度内的应变速率尽可能保持恒定。如果不能直接调节这一应变速率,可通过调节屈服前弹性阶段的应变速率并将其固定,在屈服完成之前不再调节试验机的控制。任何情况下,弹性范围内的应力速率不得超过表 2-16 规定的最大速率。
- 3) 如在同一试验中测定上屈服强度和下屈服强度,则应符合上述测定下屈服强度的规定。
- 4) 在塑性范围和直至规定强度(规定非比例延伸强度、规定总延伸强度和规定残余延伸强度)前应变速率应不超过  $0.0025\text{s}^{-1}$ 。
- 5) 若仅测定抗拉强度,在弹塑性范围内,试样工作段的应变速率可达到  $0.008\text{s}^{-1}$ 。

2.4.5 高温拉伸时的加热

1. 温度的允许偏差

加热装置均热区应不小于试样标距长度的两倍,指示温度是指在试样平行长度表面上所测量的温度。温度的允许偏差和温度梯度如表 2-17 所示。

表 2-17 温度的允许偏差和温度梯度 (单位:℃)

规定温度 $t$	允许偏差	温度梯度
$t \leq 600$	$\pm 3$	3
$600 < t \leq 800$	$\pm 4$	4
$800 < t \leq 1000$	$\pm 5$	5

2. 温度测量装置

温度测量装置的最低分辨力为  $1\text{℃}$ ,允许误差应在  $\pm 0.004t$  或  $\pm 2\text{℃}$  之内,取其大值。

热电偶应符合 JJG 141—2000《工作用贵金属热电偶检定规程》、JJG 351—1996《工业用廉金属热电偶检定规程》的要求,应不低于 2 级。

3. 温度测量系统的检验

温度测量系统应在试验温度范围内检验,检验周期不超过 3 个月。如果温度测量系统能每天自动标定,或过去的连续检验已经表明无需调节测量装置均能符合规定要求,校验的周期可以延长,但不得超过 12 个月。检验报告中应记录误差。

4. 温度的测量

热电偶测温端应与试样表面有良好的热接触,并避免加热体对热电偶的直接热辐射。当试样标距小于 50mm 时,应在试样平行长度内两端各固定一支热电偶;标距等于或大于 50mm 时,应在平行长度的两端及中间各固定一支热电偶。如果从经验中已知加热炉与试样的相对位置保证试样温度的变化不超过表 2-17 的规定时,

热电偶的数目可以减少。

## 2.4.6 低温拉伸时的冷却

### 1. 冷却方式

- 1) 借助冷却装置（低温恒温器）。
- 2) 借助压缩气体膨胀（如  $\text{CO}_2$  或  $\text{N}_2$ ）冷却。
- 3) 借助达到沸点时刻的液体（如液氮）或冷冻液（如酒精）的浸泡冷却。

### 2. 温度测量装置

温度测量装置的分辨力应该达到  $1^\circ\text{C}$  或更好，其误差为在  $-40 \sim 10^\circ\text{C}$  范围不超过  $\pm 2^\circ\text{C}$ ，在  $-196 \sim 40^\circ\text{C}$  范围应不超过  $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

### 3. 允许的温度偏差

规定温度  $t$  和指示温度  $t_1$  之间允许的温度偏差不超过  $\pm 3^\circ\text{C}$ ，试样标距两端温度差的绝对值应不超过  $3^\circ\text{C}$ 。确定温度偏差时的指示温度，是指在试验过程中的拉力至少达到测定规定非比例伸长相应的试验力时所测定的温度。温度允许偏差和梯度如表 2-18 所示。

表 2-18 温度允许偏差和梯度 (单位:  $^\circ\text{C}$ )

温度范围	温度允许偏差	温度允许梯度
$-196 \sim 10$	$\pm 2$	3
$-269 \sim 196$	$\pm 1$	3

### 4. 液体冷却介质及其温度范围

液体冷却介质及其温度范围如表 2-19 所示。

表 2-19 液体冷却介质及其温度范围

冷却介质	温度/ $^\circ\text{C}$ (K)	冷却介质	温度/ $^\circ\text{C}$ (K)
80% 冰 + 20% 氯化铵	$-15.4(257.8)$	干冰 + 工业酒精	$-75(198)$ 以上
75.2% 冰 + 24.8% 食盐	$-21.3(251.9)$	干冰 + 无水乙醇	$-78(195)$ 以上
62.7% 冰 + 19.7% 食盐 + 17.6% 氯化铵	$-25.0(248.0)$	液氮 + 无水乙醇	$-105(168)$ 以上
		液氮	$-196(77)$
41.2% 冰 + 58.8% 氯化钙	$-54.9(218.3)$		

注：表中百分数为质量分数。

## 2.5 拉伸性能的测定

### 2.5.1 断后伸长率和断裂总伸长率的测定

#### 1. 定义法测断后伸长率

- 1) 为了测定断后伸长率，应将试样断裂的部分仔细地配接在一起，使其轴线



处于同一直线上，并采取特别措施确保试样断裂部分适当接触后测量试样断后标距。这对小横截面试样和低伸长率试样尤为重要。如果达不到上述要求，为了避免试样报废，可以采用移位方法测定断后伸长率。

2) 应使用分辨力优于  $0.1\text{mm}$  的量具或测量装置测定断后标距，准确到  $\pm 0.25\text{mm}$ 。如果规定的最小断后伸长率小于  $5\%$ ，应采用下面的特殊方法进行测定。

试验前在平行长度的一端处作一很小的标记。使用调节到标距的分规，以此标记为圆心划一圆弧。拉断后，将断裂的试样置于一装置上，最好借助螺钉施加轴向力，以使其在测量时牢固地对接在一起。以原圆心为圆心，以相同的半径划第二个圆弧。用工具显微镜或其他合适的仪器测量两个圆弧之间的距离即为断后伸长，准确到  $\pm 0.2\text{mm}$ 。为使划线清晰可见，试验前涂上一层染料。

3) 原则上，只有断裂处与最接近的标距标记的距离不小于原始标距的  $1/3$  的情况方为有效；但断后伸长率大于或等于规定值，不管断裂位置处于何处测量均为有效。

4) 能用引伸计测定断裂延伸的试验机，引伸计标距应等于试样原始标距，无需标出试样原始标距的标记。以断裂时的总延伸作为伸长量时，为了得到断后伸长率，应从总延伸中扣除弹性延伸部分。原则上，断裂发生在引伸计标距以内方为有效；但断后伸长率等于或大于规定值，不管断裂位置处于何处测量均为有效。

5) 可以在一固定标距上测定断后伸长率，然后使用换算公式或换算表将其换算成比例标距的断后伸长率。对于碳素钢和低合金钢， $5.65\sqrt{S_0}$  与  $50\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-21 所示， $5.65\sqrt{S_0}$  与  $200\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-22 所示， $4\sqrt{S_0}$  与  $50\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-23 所示， $4\sqrt{S_0}$  与  $200\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-24 所示。对于奥氏体钢， $5.65\sqrt{S_0}$  与  $50\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-25 所示， $5.65\sqrt{S_0}$  与  $200\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-26 所示， $4\sqrt{S_0}$  与  $50\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-27 所示， $4\sqrt{S_0}$  与  $200\text{mm}$  定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-28 所示。

例： $25\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ ，横截面积为  $312.5\text{mm}^2$ ，标距为  $200\text{mm}$  的试样，断后伸长率  $21\%$ ，求标距  $5.65\sqrt{S_0}$  的断后伸长率。

从图 2-22 的横坐标上找到  $312.5\text{mm}^2$  和纵坐标上找到  $21$ ，其交点通过的斜线所对应的值为  $27.7\%$ ，修约到  $28\%$ ，即为欲求的  $5.65\sqrt{S_0}$  标距的断后伸长率值。



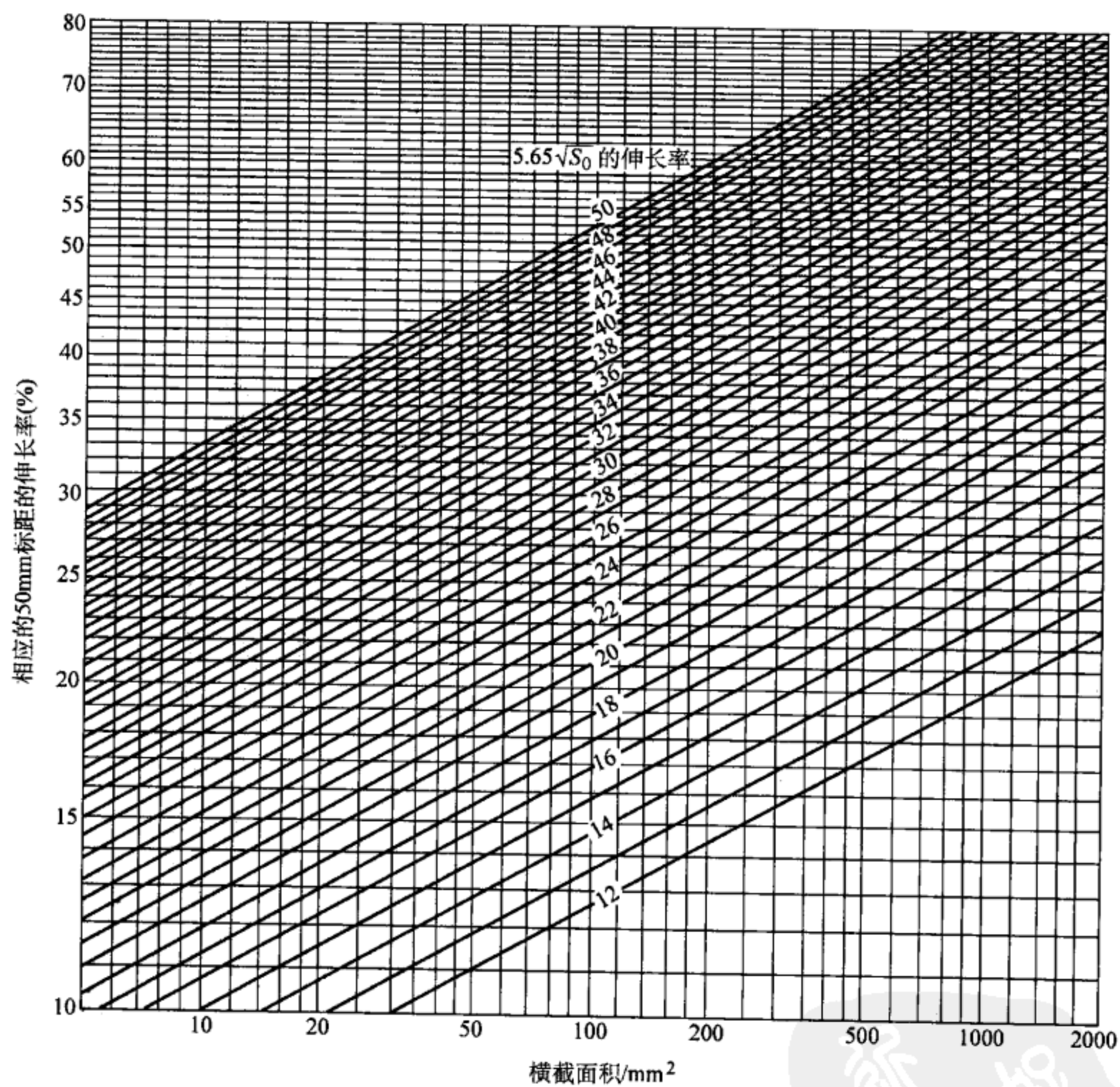


图 2-21 碳素钢和低合金钢  $5.65\sqrt{S_0}$  与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

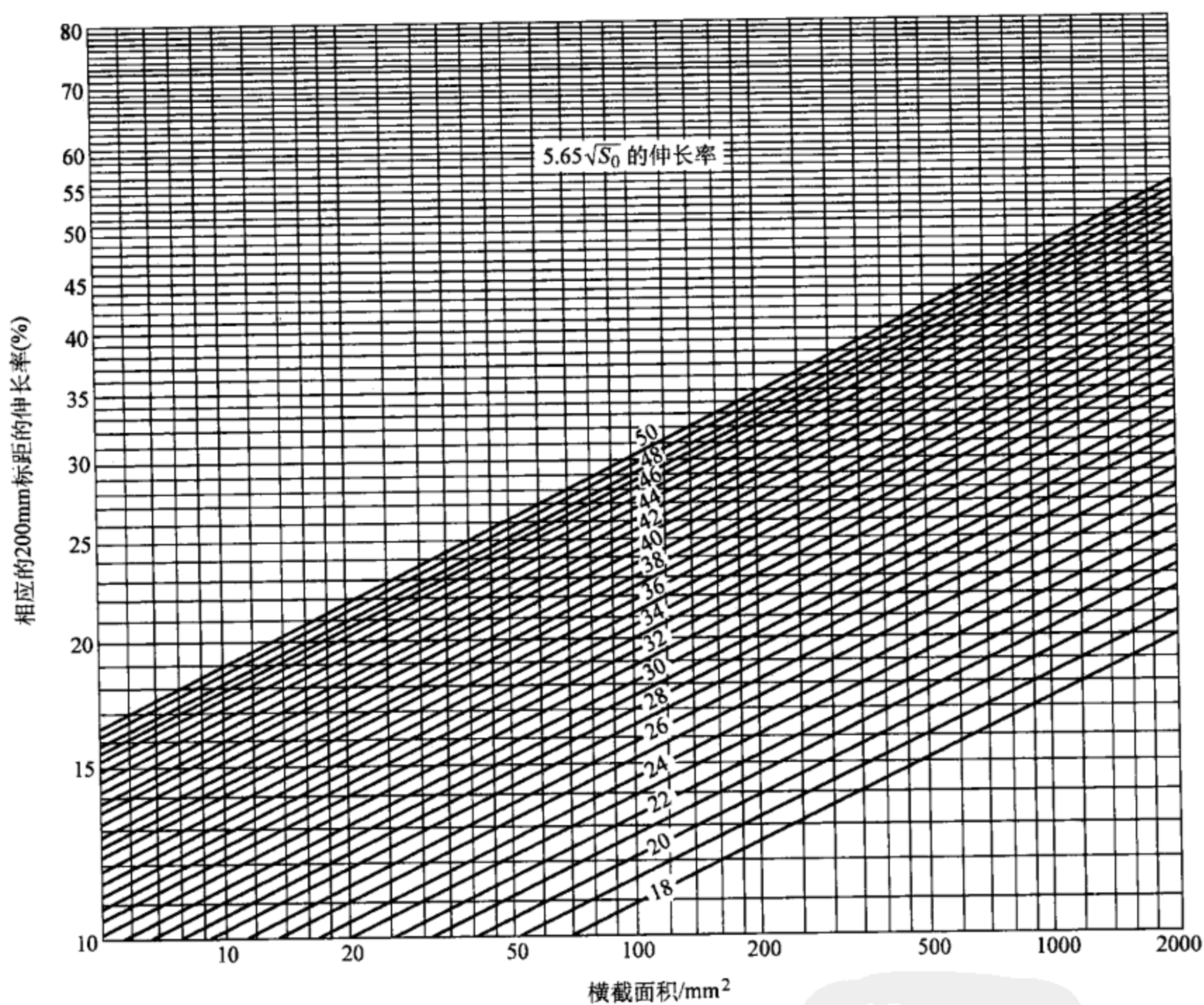


图 2-22 碳素钢和低合金钢  $5.65\sqrt{S_0}$  与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

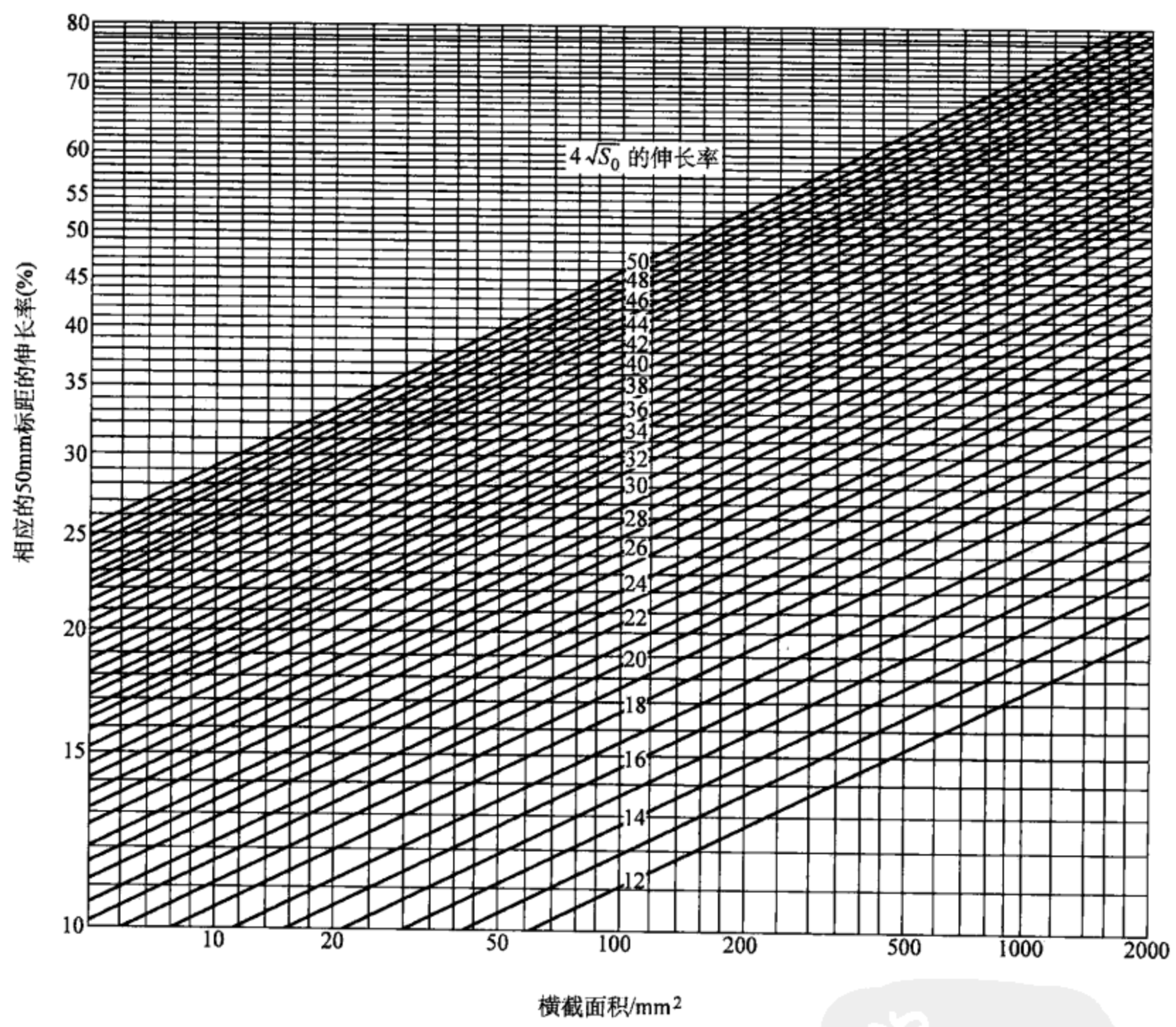


图 2-23 碳素钢和低合金钢  $4\sqrt{S_0}$  与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

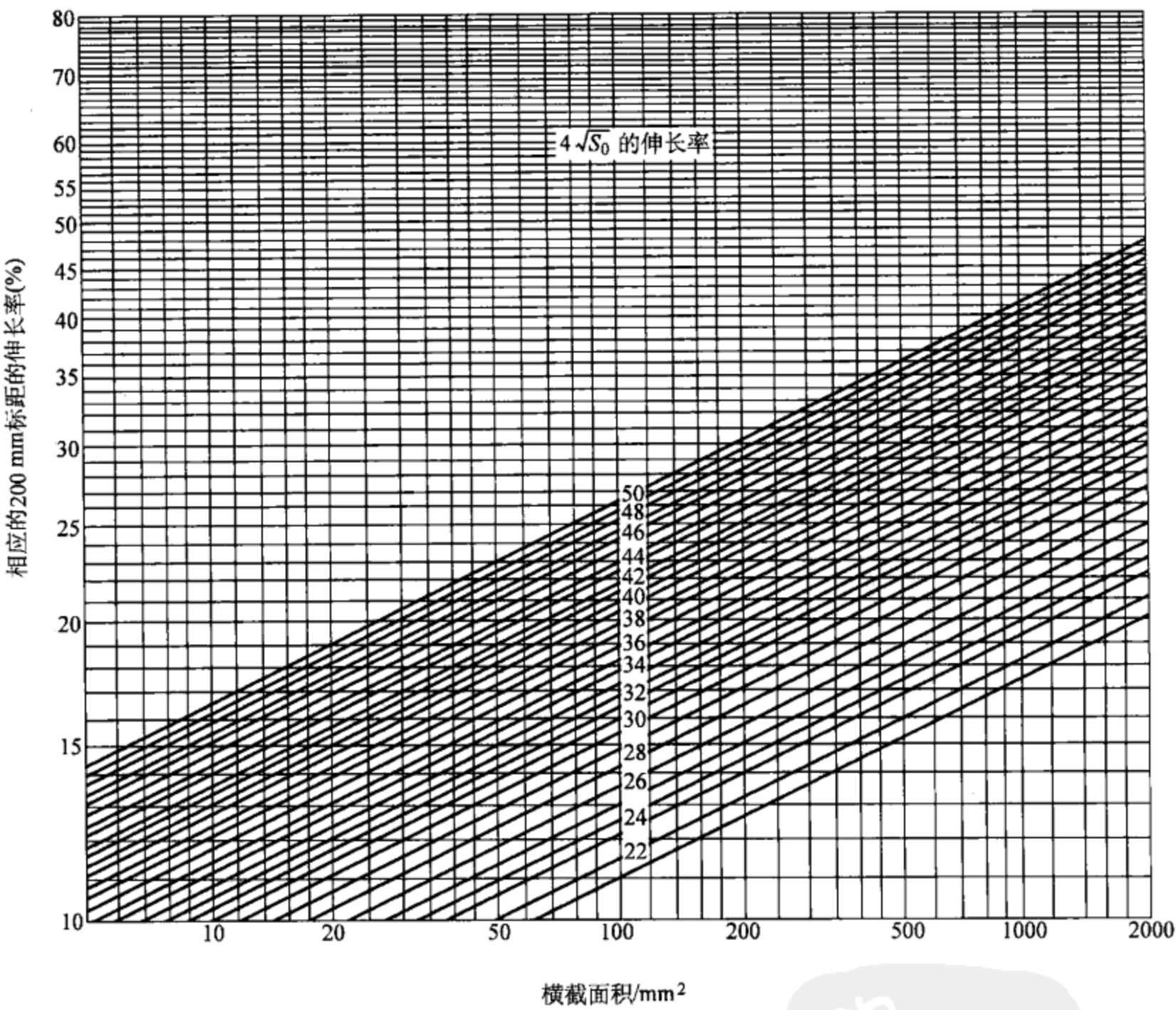


图 2-24 碳素钢和低合金钢  $4\sqrt{S_0}$  与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

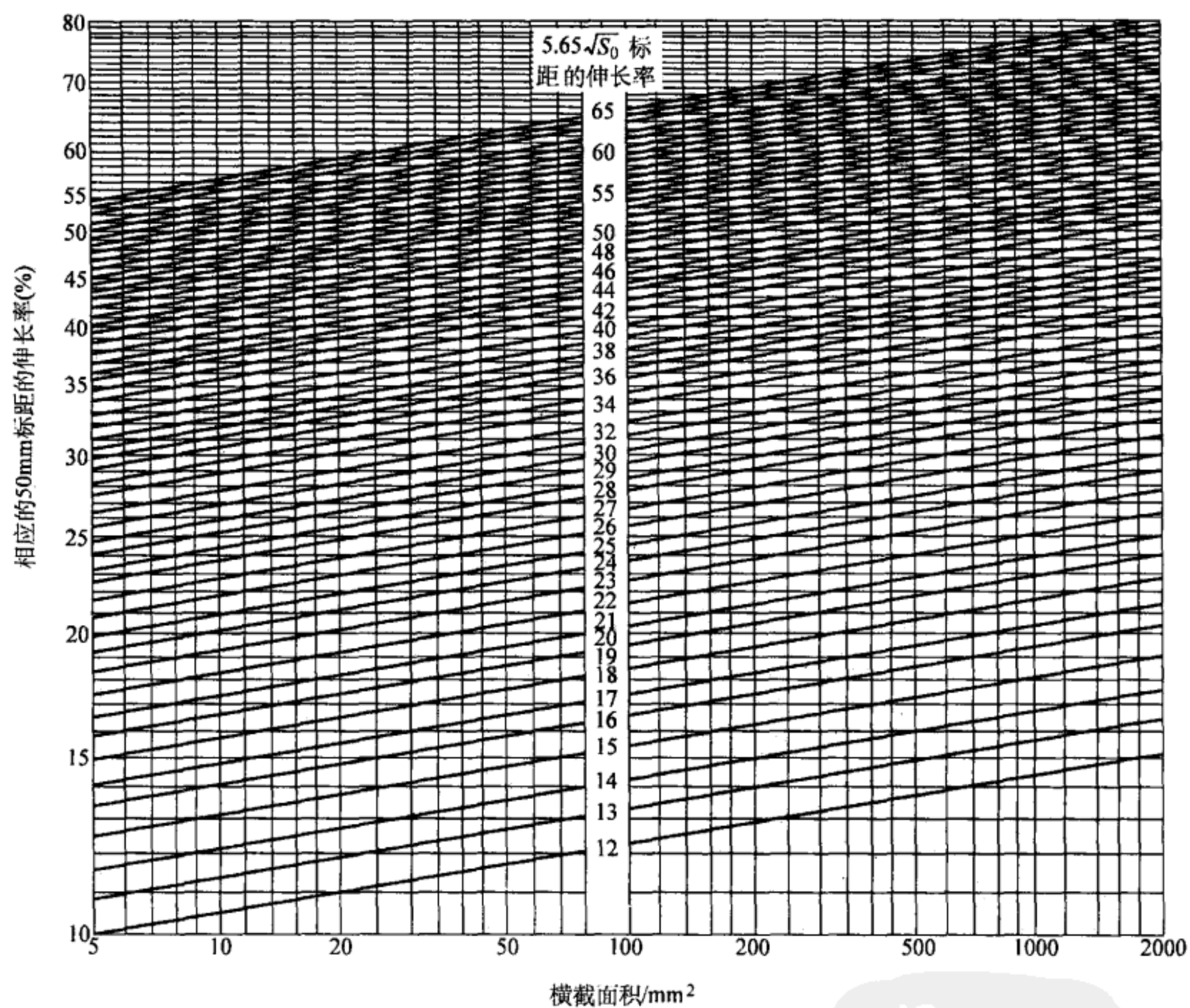


图 2-25 奥氏体钢  $5.65\sqrt{S_0}$  与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系



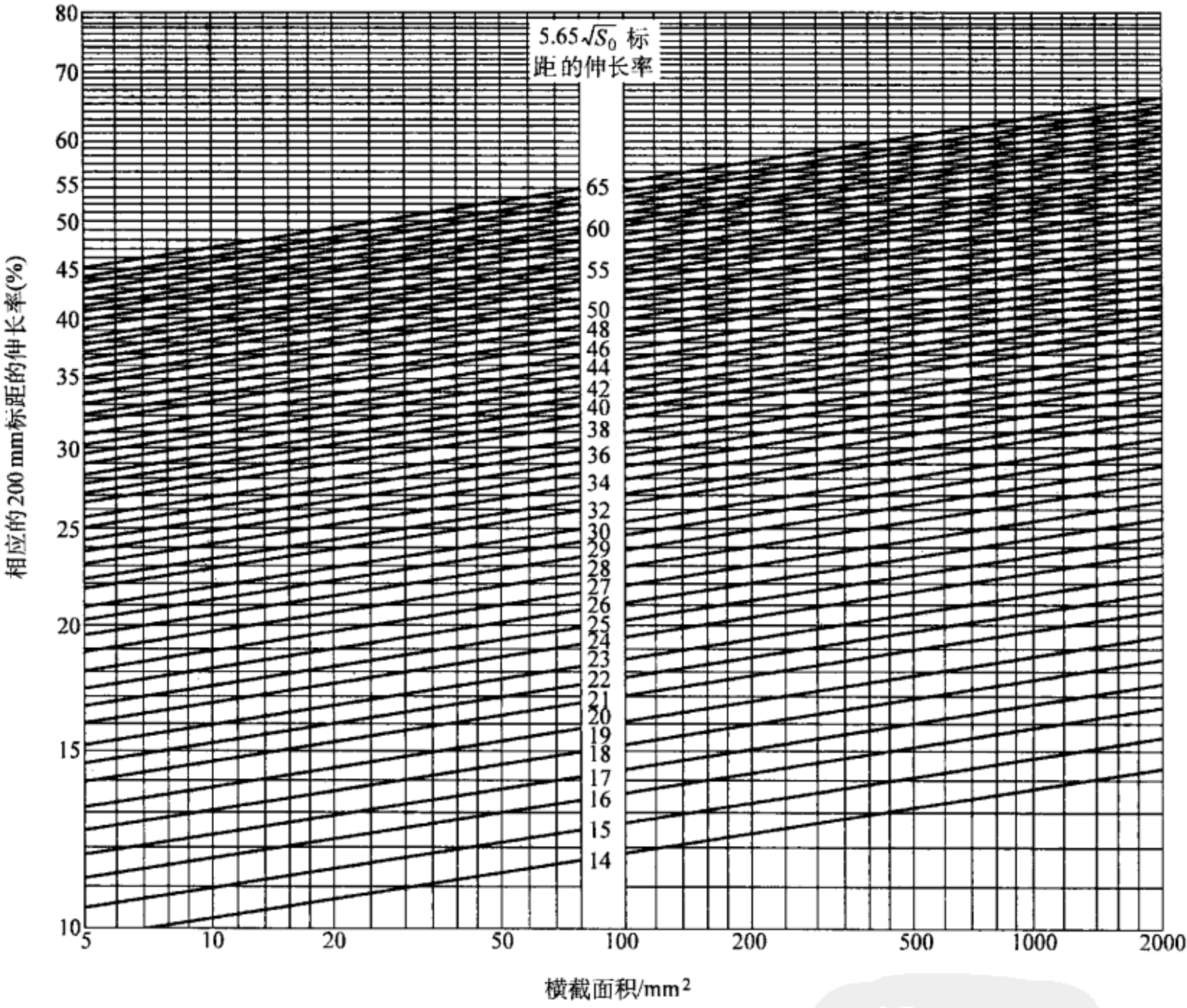


图 2-26 奥氏体钢 5.65  $\sqrt{S_0}$  与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系



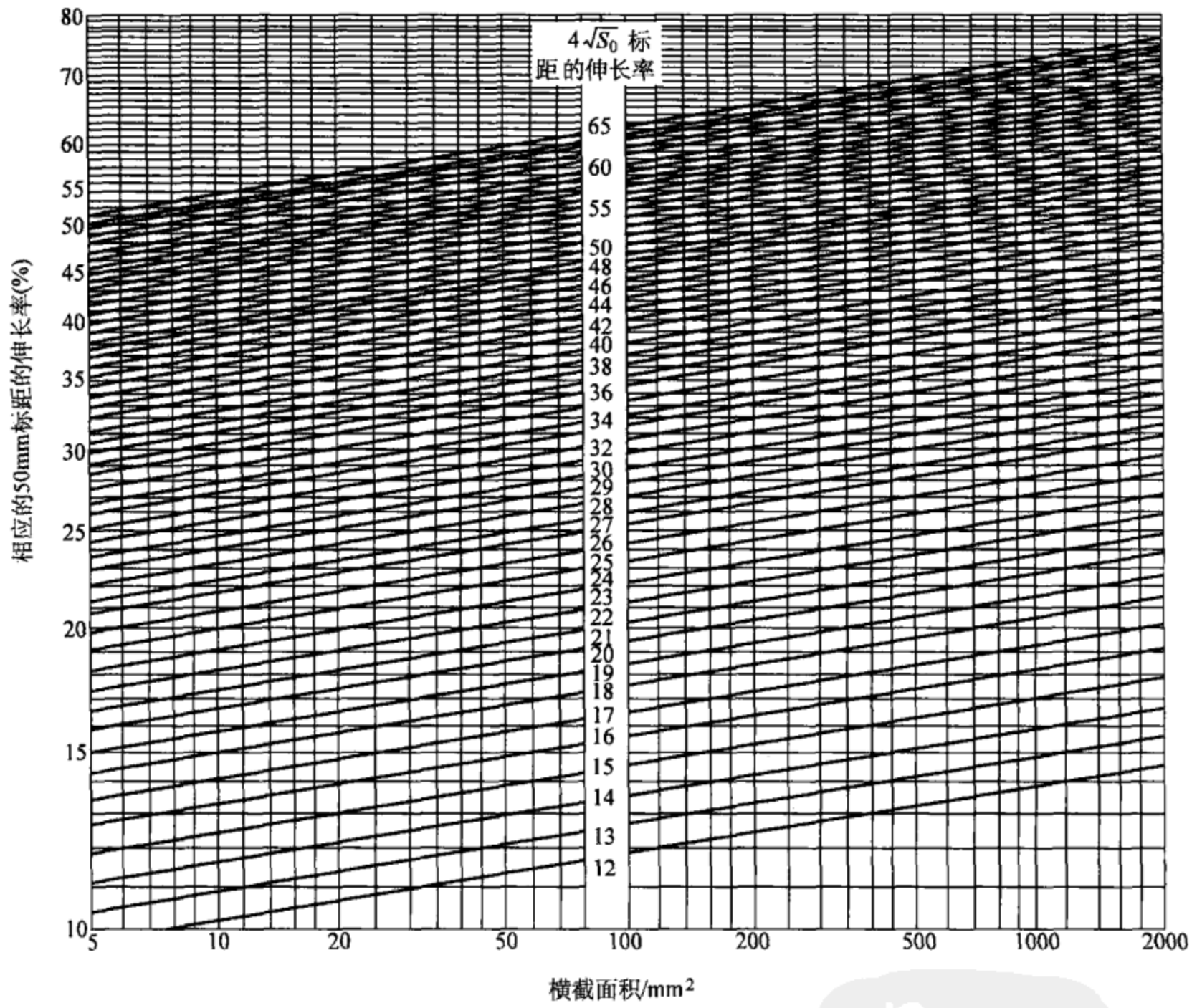


图 2-27 奥氏体钢 4  $\sqrt{S_0}$  与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

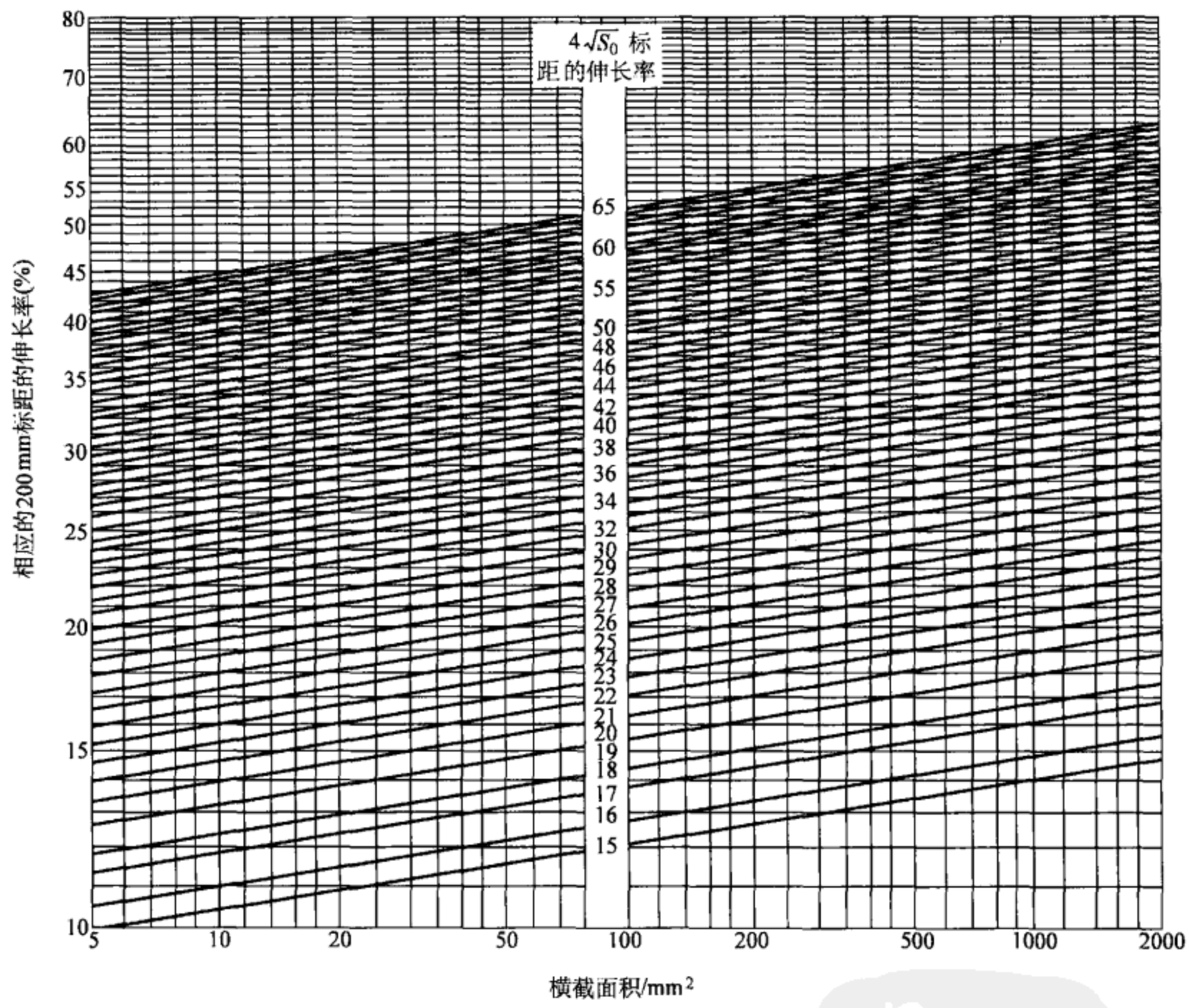


图 2-28 奥氏体钢 4  $\sqrt{S_0}$  与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

## 2. 移位法测断后伸长率

1) 试验前将原始标距等分为  $N$  份。

2) 试验后，以符号  $X$  表示断裂后试样短段的标距标记，以符号  $Y$  表示断裂试样长段的等分标记，此标记与断裂处的距离最接近于断裂处至标距标记  $X$  的距离， $X$  与  $Y$  之间的分格数记为  $n$ 。

3) 如  $N-n$  为偶数，如图 2-29a 所示，测量  $X$  与  $Y$  之间的距离和测量从  $Y$  至距离为  $(N-n)/2$  个分格的  $Z$  标记之间的距离。按照下式计算断后伸长率：

$$A = \frac{XY + 2YZ - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——原始标距，单位为 mm。

4) 如  $N-n$  为奇数，如图 2-29b 所示，测量  $X$  与  $Y$  之间的距离和测量从  $Y$  至距离为  $(N-n-1)/2$  和  $(N-n+1)/2$  个分格的  $Z'$  和  $Z''$  标记之间的距离。按照下式计算断后伸长率：

$$A = \frac{XY + YZ' + YZ'' - L_0}{L_0} \times 100\%$$

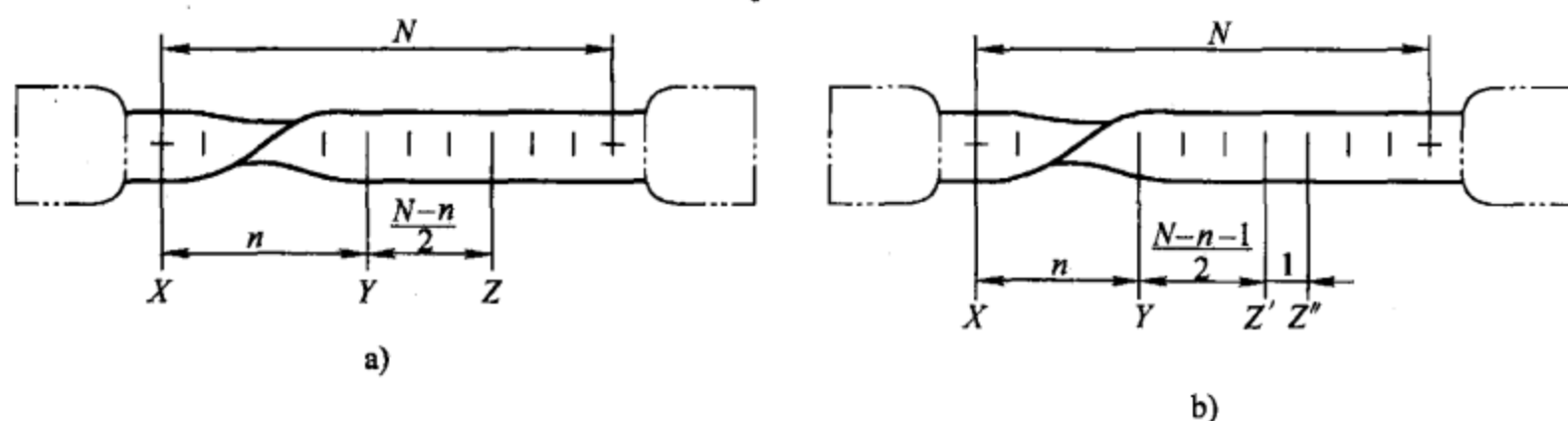


图 2-29 移位法图示说明

a)  $N-n$  为偶数 b)  $N-n$  为奇数

## 3. 断裂总伸长率的测定

在拉伸试验中，有些条件下可以用引伸计来测定断裂时的延伸（引伸计一直跟踪到试样拉断），此时引伸计标距应与试样标距一致。用测定的断裂总延伸除以试样原始标距得到断裂总伸长率。当以引伸计记录的断裂时的总延伸作为伸长量测定断后伸长率时，应以总延伸中扣除弹性延伸部分。此外，测定断后伸长率时，如果测得的值大于规定的要求，不管断裂位置在何处，采用哪一种测量均为有效。

### 2.5.2 最大力总伸长率和最大力非比例伸长率的测定

#### 1. 定义法测最大力总伸长率和最大力非比例伸长率

1) 在用引伸计得到的力-延伸曲线图上测定最大力时的总延伸 ( $\Delta L_m$ )，最大

力总伸长率 ( $A_{gt}$ ) 按下式计算:

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100\%$$

式中  $L_e$ ——引伸计标距, 单位为 mm。

2) 从最大力时的总延伸  $\Delta L_m$  中扣除弹性延伸部分即得到最大力时的非比例延伸, 将其除以引伸计标距得到最大力非比例伸长率 ( $A_g$ ),  $A_g = (\Delta L_g / L_e) \times 100\%$ 。

3) 有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况, 取平台中点的最大力对应的总伸长率。

4) 试验报告中应报告引伸计标距。

5) 如果试验是在计算机控制的具有数据采集系统的试验机上进行, 直接在最大力点测定总伸长率和相应的非比例伸长率, 可以不绘制力-延伸曲线图。

## 2. 人工方法测定棒材、线材和条材等长产品的最大力总伸长率

人工方法是测量已拉伸试验过的试样最长部分在最大力时的非比例伸长, 其原理是测量拉断试样的不包括缩颈断裂部分的非比例伸长, 根据此伸长计算总伸长率。

试验前, 根据产品规定的要求确定  $L'_0$ , 在标距上标出等分格标记, 连续两个等分格标记之间的距离等于原始标距 ( $L'_0$ ) 的约数, 原始标距的标记应准确到  $\pm 0.5\text{mm}$  以内。断裂后, 在试样的最长部分上测量断后标距  $L'_u$ , 准确到  $\pm 0.5\text{mm}$ 。为使测量有效, 使测量区的范围应处于距离断裂处至少  $5d$ , 并距离夹头至少为  $2.5d$ , 且测量用的原始标距应至少等于产品标准中规定的值。

最大力非比例伸长率按照下式计算:

$$A_g = \frac{L'_u - L'_0}{L'_0} \times 100\%$$

最大力总伸长率按照下式计算:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{E} \times 100\%$$

式中  $E$ ——弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ , 其值由相关产品标准给定;

$R_m$ ——抗拉强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ 。

### 2.5.3 屈服点延伸率的测定

试验时, 记录力-延伸曲线直至达到均匀加工硬化阶段。在曲线图上, 经过屈服阶段结束点划一条平行于曲线的弹性直线段的平行线, 此平行线在曲线图的延伸轴上的截距即为屈服点延伸, 屈服点延伸除以引伸计标距得到屈服点延伸率, 如图 2-30 所示。试验报告中应报告引伸计标距。

## 2.5.4 上屈服强度和下屈服强度的测定

对有明显屈服现象的材料，应测定其上、下屈服强度；无明显屈服现象的材料，按要求测定规定非比例延伸强度或规定残余延伸强度（一般为  $R_{p0.2}$  或  $R_{r0.2}$ ）。上、下屈服强度判定应采用以下基本原则：

1) 屈服前的第一个峰值应力（第1个极大值应力）判为上屈服强度，不管其后的峰值应力比它大或比它小。

2) 屈服阶段中如呈现两个或两个以上的谷值应力，舍去第1个谷值应力（第1个极小值应力）不计，取谷值应力中最小者判为下屈服强度。如只呈现1个谷值应力则判为下屈服强度。

3) 屈服阶段中呈现屈服平台，平台应力判为下屈服强度；如呈现多个而且后者高于前者的屈服平台，判第1个平台应力为下屈服强度。

4) 正确的判定结果应是下屈服强度低于上屈服强度。

上屈服强度和下屈服强度的测定方法有图解法和指针法两种。

### 1. 图解法

试验时记录力-延伸曲线或力-位移曲线。从曲线图读取力首次下降前的最大力和不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力或屈服平台的恒定力，将它们分别除以试样原始横截面积得到上屈服强度和下屈服强度。

### 2. 指针法

试验时，读取测力度盘指针首次回转前指示的最大力和不计初始瞬时效应时屈服阶段中指示的最小力或首次停止转动指示的恒定力，将它们分别除以试样原始横截面积得到上屈服强度和下屈服强度。

## 2.5.5 规定非比例延伸强度的测定

### 1. 定义法

在力-延伸曲线图上，划一条与曲线的弹性直线段部分平行，且在延伸轴上与此直线段的距离等效于规定非比例延伸率，例如 0.2% 的直线。此平行线与曲线的交截点给出相应于所求规定非比例延伸强度的力  $F_p$ 。此力除以试样原始横截面积得到规定非比例延伸强度。

如果力-延伸曲线图的弹性直线部分不能明确地确定，以致不能以足够的准确度划出这一平行线，可采用如下方法：

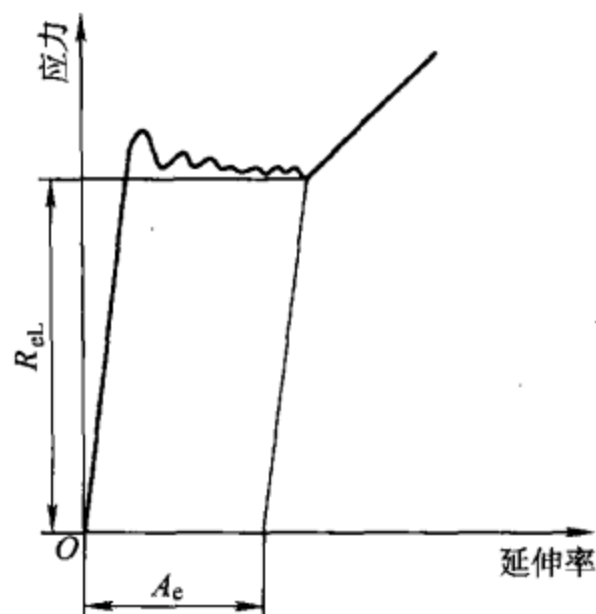


图 2-30 屈服点延伸率 ( $A_e$ )



试验时,当已超过预期的规定非比例延伸强度相应的力值后,将力降至约为已达到的力的10%,然后再施加力直至超过原已达到的力。为了测定规定非比例延伸强度,过滞后环划一直线。然后经过横轴上与曲线原点的距离等效于所规定的非比例延伸率的点,作平行于此直线的平行线。平行线与曲线的交点给出相应于规定非比例延伸强度的力。此力除以试样原始横截面积得到规定非比例延伸强度,如图2-31所示。

## 2. 逐步逼近法

逐步逼近方法适用于具有无明显弹性直线段金属材料的测定,也适用于力-延伸曲线图具有弹性直线段高度不低于 $0.5F_m$ 的金属材料。

试验时,记录力-延伸曲线图,至少直至超过预期的规定非比例延伸强度的范围。在力-延伸曲线上任意估取 $A_0$ 点拟为规定非比例延伸率等于0.2%时的力 $F_{P0.2}^0$ ,在曲线上分别确定力为 $0.1F_{P0.2}^0$ 和 $0.5F_{P0.2}^0$ 的 $B_1$ 和 $D_1$ 两点,作直线 $B_1D_1$ 。从曲线原点 $O$ (必要时进行原点修正)起截取 $OC$ 段( $OC = 0.2\% L_e n$ ,式中 $n$ 为延伸放大倍数),过 $C$ 点作平行于 $B_1D_1$ 的平行线 $CA_1$ 交曲线于 $A_1$ 点。如 $A_1$ 与 $A_0$ 重合, $F_{P0.2}^0$ 即为相应于规定非比例延伸率为0.2%时的力。

如 $A_1$ 点未与 $A_0$ 重合,需要按照上述步骤进行进一步逼近。此时,取 $A_1$ 点的力 $F_{P0.2}^1$ ,在曲线上分别确定力为 $0.1F_{P0.2}^1$ 和 $0.5F_{P0.2}^1$ 的 $B_2$ 和 $D_2$ 两点,作直线 $B_2D_2$ 。过 $C$ 点作平行于 $B_2D_2$ 的平行线 $CA_2$ 交曲线于 $A_2$ 点。

如此逐步逼近,直至最后一次得到的交点 $A_n$ 与前一次的交点 $A_{n-1}$ 重合,如图2-32所示。 $A_n$ 的力即为规定非比例延伸率达0.2%时的力。此力除以试样原始横截面积得到测定的规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}$ 。

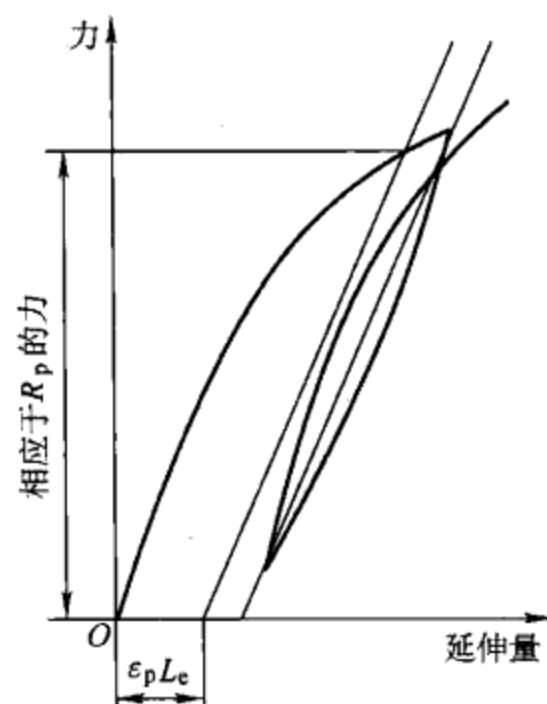


图2-31 规定非比例延伸强度( $R_p$ )

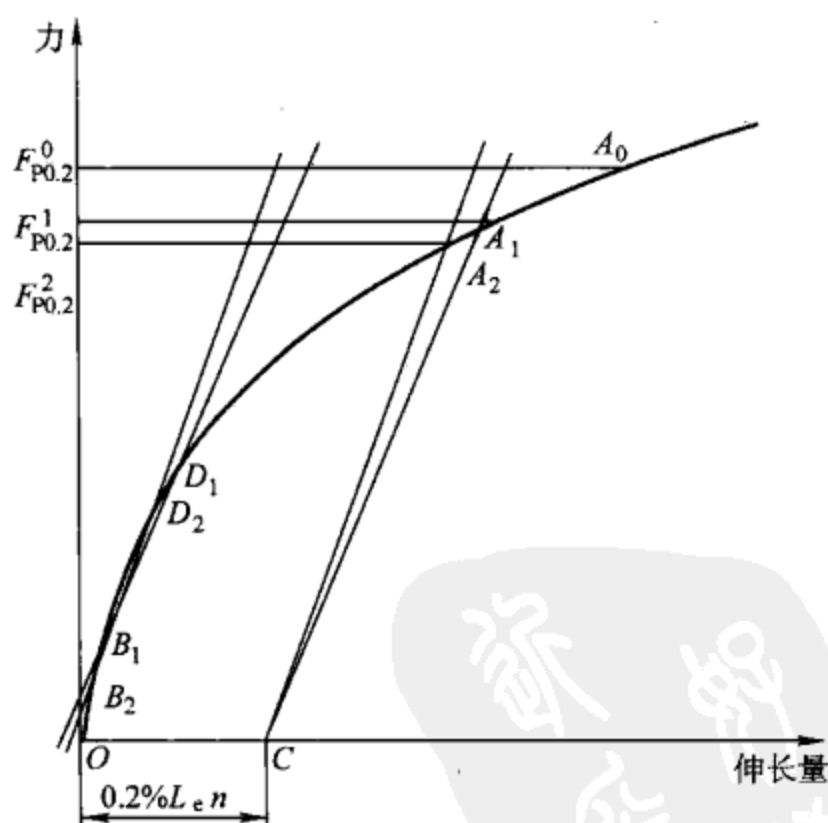


图2-32 逐步逼近法测定规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}$



最终得到的直线  $B_n D_n$  的斜率，一般可以作为确定其他规定非比例延伸强度的基准斜率。

### 2.5.6 规定总延伸强度的测定

在力-延伸曲线图上，划一条平行于力轴并与该轴的距离等效于规定总延伸率的平行线，此平行线与曲线的交点给出相应于规定总延伸强度的力  $F_t$ ，此力除以试样原始横截面积得到规定总延伸强度。

### 2.5.7 抗拉强度的测定

对于呈现明显屈服（不连续屈服）现象的金属材料，从记录的力-延伸或力-位移曲线图，或从测力度盘读取过了屈服阶段之后的最大力，如图 2-33 所示。对于呈现无明显屈服（连续屈服）现象的金属材料，从记录的力-延伸或力-位移曲线图，或从测力度盘读取试验过程中的最大力（ $F_m$ ）。最大力（ $F_m$ ）除以试样原始横截面积（ $S_0$ ）得到抗拉强度。

对于显示特殊屈服现象的材料，相应于上屈服点的应力可能高于此后任一应力值（第二极大值，如图 2-34 所示）。如遇此种情况，需要选定两个极大值中之一作为抗拉强度。

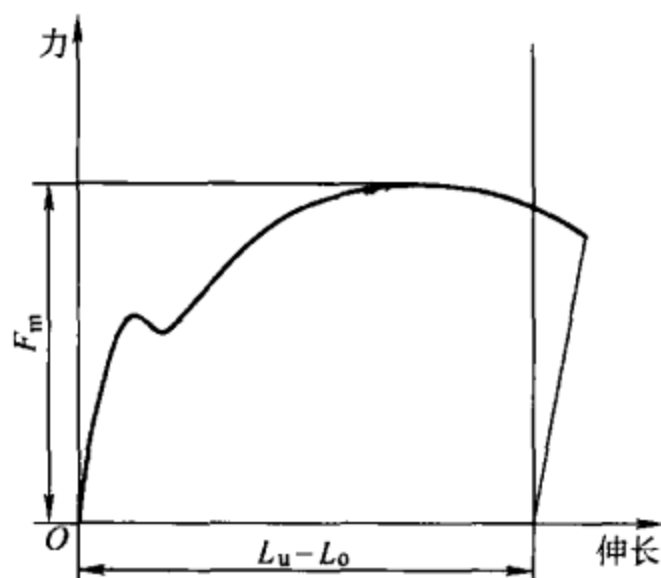


图 2-33 最大力  $F_m$

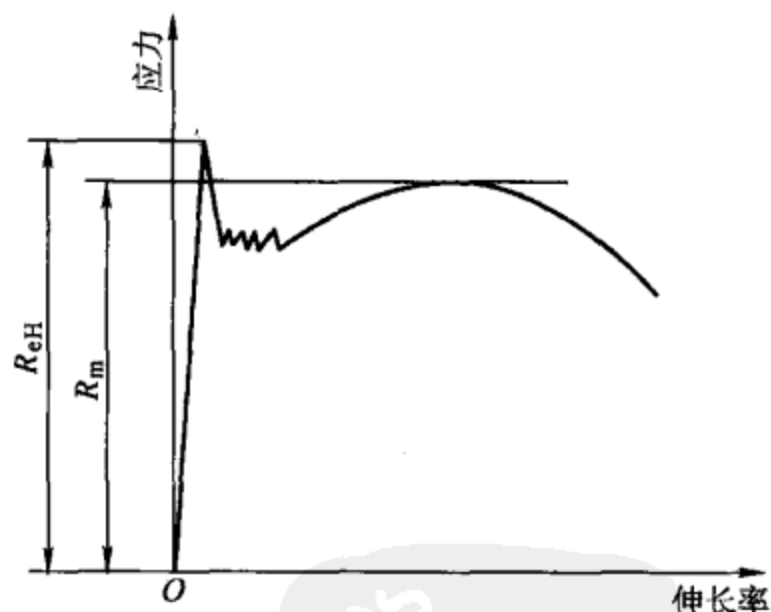


图 2-34 出现特殊屈服现象材料的抗拉强度

### 2.5.8 断面收缩率的测定

按照定义测定断面收缩率，断裂后最小横截面积的测定应准确到  $\pm 2\%$ 。测量时，如果需要，可将试样断裂部分仔细地配接在一起，使其轴线处于同一直线上。对于圆形横截面试样，在缩颈最小处相互垂直方向测量直径，取其算术平均值计算最小横截面积。对于矩形横截面试样，测量缩颈处的最大宽度  $b_u$  和最小厚度  $a_u$ ，如图 2-35 所示，两者之乘积为断后最小横截面积  $S_u$ 。

原始横截面积 ( $S_0$ ) 与断后最小横截面积 ( $S_u$ ) 之差除以原始横截面积  $S_0$  的百分率, 得到断面收缩率  $Z$ 。

薄板和薄带试样、管材全截面试样、圆管纵向弧形试样和其他复杂横截面试样及直径小于 3mm 试样, 一般不测定断面收缩率。

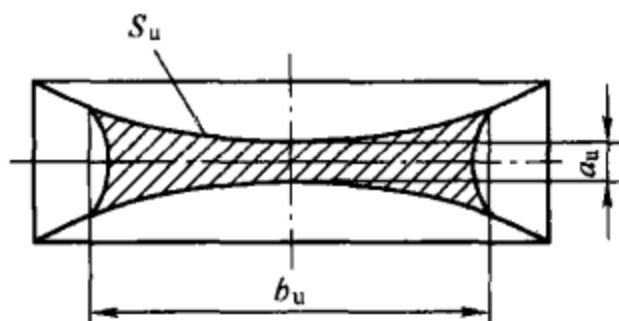


图 2-35 矩形横截面试样缩颈处最大宽度和最小厚度

### 2.5.9 拉伸杨氏模量的测定

对于拉伸试验记录曲线有弹性直线段的材料, 可以测定拉伸杨氏模量  $E$ ; 没有直线段的材料, 可以测定其条件模量 (切线模量  $E_{ch}$  和弦线模量  $E_{tan}$ )。

试验时, 用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形 ( $F-\Delta L_{el}$ ) 曲线, 如图 2-36 所示。

在记录的轴向力-轴向变形曲线上, 确定弹性直线段, 变形放大倍数的选择应使轴向力-轴向变形曲线的弹性直线段和力轴的夹角不小于  $40^\circ$ 。在该直线段上读取相距尽量远的  $A$ 、 $B$  两点之间的轴向力变化量  $\Delta F$  (单位为 N) 和相应的轴向变形变化量  $\Delta l$  (单位为 mm), 按下式计算拉伸杨氏模量  $E$  (单位为  $N/mm^2$ )。

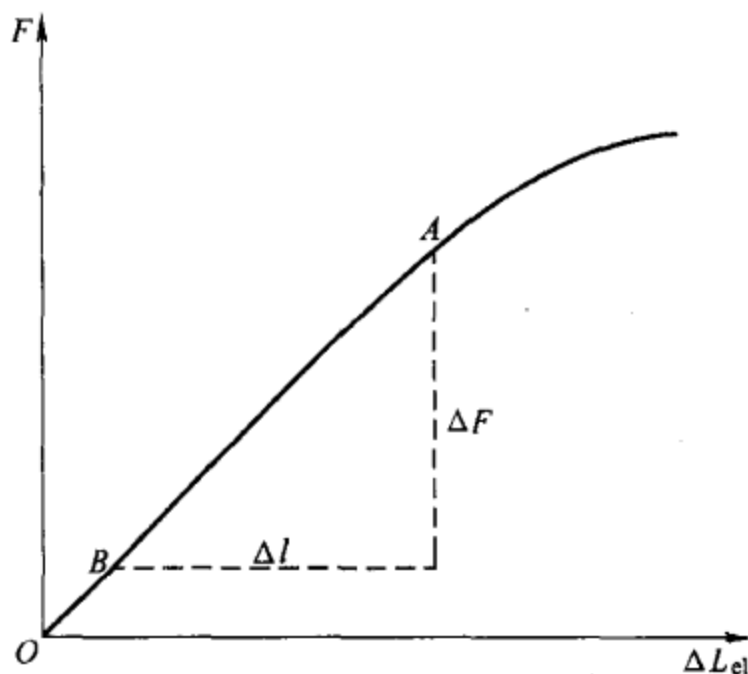


图 2-36 图解法测定拉伸杨氏模量

$$E = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \left( \frac{\Delta l}{L_{el}} \right)$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度的原始横截面积, 单位为  $mm^2$ ;

$L_{el}$ ——轴向引伸计标距, 单位为 mm。

测量时, 一般选用圆形或矩形截面试样, 试验机和引伸计要满足 1 级精度要求。

### 2.5.10 弦线模量的测定

#### 1. 图解法

试验时, 用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形 ( $F-\Delta L_{el}$ ) 曲线, 如图 2-37 所示。

在记录的轴向力-轴向变形曲线上, 通过与所规定的上下两应力点或两应变点对应的  $A$ 、 $B$  两点画弦线。在所画的弦线上读取轴向力增量  $\Delta F$  (单位为 N) 和相

应的轴向变形变化量  $\Delta l$  (单位为 mm), 按下式计算弦线模量  $E_{ch}$  (单位为  $N/mm^2$ ):

$$E_{ch} = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \left( \frac{\Delta l}{L_{el}} \right)$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度的原始横截面积, 单位为  $mm^2$ ;

$L_{el}$ ——轴向引伸计标距, 单位为 mm。

## 2. 拟合法

试验时, 在弹性范围内记录轴向力和相应的轴向变形的一组数字数据对。将该组数据对拟合一数学表达式 (例如多项式), 得到拟合的轴向应力-轴向应变曲线。在拟合的轴向应力-轴向应变曲线的弹性范围内, 计算两规定应力或应变值之间所对应弦线的斜率, 即为弦线模量。对于非线性弹性金属材料, 有关标准或协议在确定弦线模量时, 应说明确定弦线的上、下两点的应力或应变值。

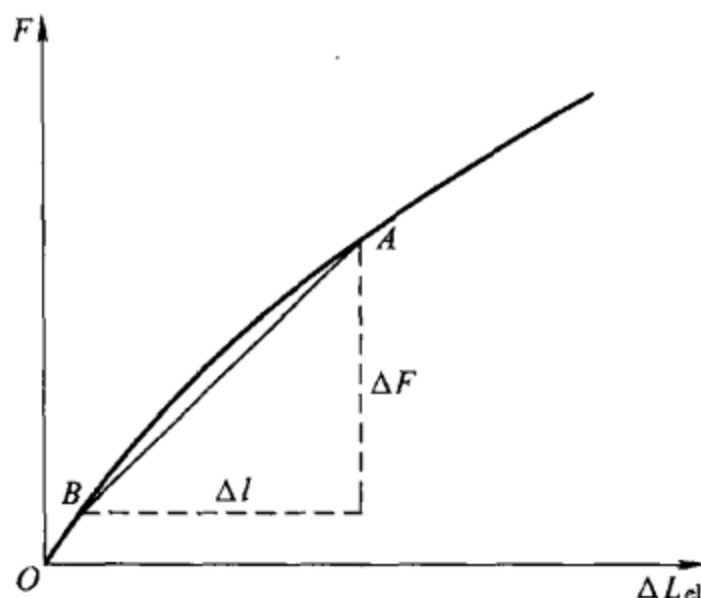


图 2-37 图解法测定弦线模量

## 2.5.11 切线模量的测定

### 1. 图解法

试验时, 用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形 ( $F-\Delta L_{el}$ ) 曲线, 如图 2-38 所示。

在记录的轴向力-轴向变形曲线上, 通过规定应力或应变值对应的  $R$  点作曲线的切线。在所画出的切线上读取相距尽量远的  $A$ 、 $B$  两点之间的轴向力增量  $\Delta F$  (单位为 N) 和相应的轴向变形变化量  $\Delta l$  (单位为 mm), 按下式计算切线模量  $E_{tan}$  (单位为  $N/mm^2$ ):

$$E_{tan} = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \left( \frac{\Delta l}{L_{el}} \right)$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度的原始横截面积, 单位为  $mm^2$ ;

$L_{el}$ ——轴向引伸计标距, 单位为 mm。

### 2. 拟合法

试验时, 在弹性范围内记录轴向力和

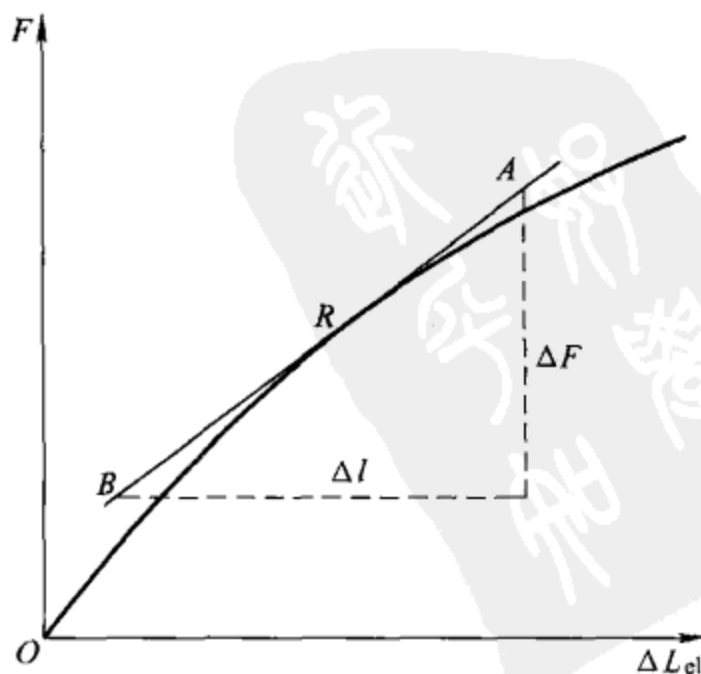


图 2-38 图解法测定切线模量

相应的轴向变形的一组数字数据对, 将该组数据对拟合一数学表达式 (例如多项式), 得到拟合的轴向应力-轴向应变曲线。在拟合的轴向应力-轴向应变曲线的弹性范围内, 计算曲线在规定应力或应变值处的斜率, 即为切线模量。对于非线性弹性金属材料, 有关标准或协议在规定切线模量时, 应说明切点的应力或应变值。

### 2.5.12 电阻应变计测定弹性模量

1) 外观检查应变计, 应该丝栅不乱, 无氧化, 引线牢固。一般采用  $0.1\Omega$  精度电桥测量每个应变计电阻值, 检查电阻有无变值或出现飘移等现象, 每片之间的电阻值偏差最好不超过  $\pm 0.1\Omega$ 。

2) 试样贴片处应进行必要的机械打磨, 表面粗糙度  $Ra$  在  $1.6 \sim 2.5\mu m$  为宜。用划针在测点处划出贴片定位线, 用浸有丙酮或无水乙醇脱脂棉球将贴片位置及周围擦洗干净, 直至棉球洁白为止。

3) 在应变计基底面和贴片处涂抹一层薄薄的粘接胶, 然后把应变计对准试样的贴片标记处, 用一小片塑料 (如聚四氟乙烯) 薄膜盖在应变计上; 再用大拇指按压, 从应变计一端开始作无滑动的滚动, 将应变计下的多余胶水或气泡排除。

4) 在拉、压试样轴线两侧对称位置各贴一电阻应变计, 应变片轴线应与试样轴线平行或垂直。

5) 已安装完毕的电阻应变计, 应进行应变计质量检查, 检查是否有断丝现象, 电阻值是否与原来相同, 绝缘电阻是否满足测量要求。

6) 测量导线与应变计引出线连接的焊点要小而牢固, 并保证焊点与被测表面的良好绝缘和固定。

7) 电阻应变计与应变仪的桥路连接通常采用半桥 (如图 2-39a 所示) 或全桥 (如图 2-39b 所示) 方式连接。

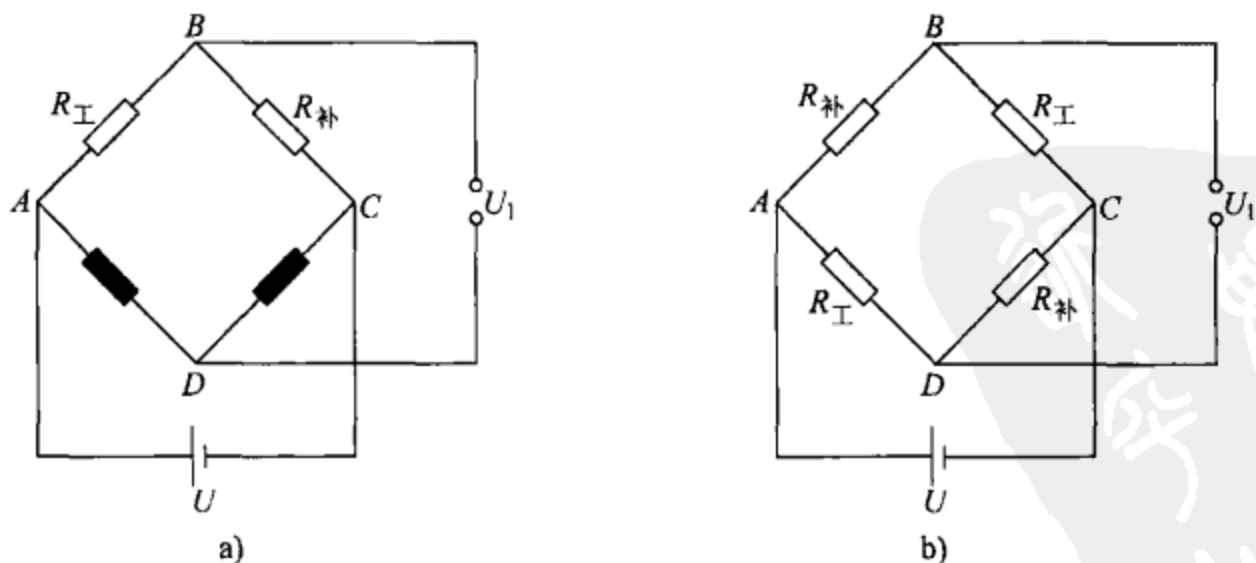


图 2-39 电阻应变计与应变仪的桥路连接

a) 半桥接法 b) 全桥接法

半桥接法是将试样两侧各粘贴的沿轴向两电阻应变计 (简称工作片) 的两端,

分别接在应变仪的  $A$ 、 $B$  接线端上，温度补偿片接到应变仪的  $B$ 、 $C$  接线端上。当试样轴向受力时，电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变  $e_1$ 。全桥接法是把两片轴向的工作片和两片温度补偿片接入应变仪的  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  接线端中。当试样轴向受力时，电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变  $e_1$ ，因为应变仪显示的应变是两片应变计的应变之和，所以试样轴向应变应为应变仪所显示值的一半。

8) 杨氏模量  $E$  (单位为  $\text{N/mm}^2$ )、弦线模量  $E_{\text{ch}}$  (单位为  $\text{N/mm}^2$ ) 和切线模量  $E_{\text{tan}}$  (单位为  $\text{N/mm}^2$ ) 按下式计算：

$$E = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \Delta e_1$$

$$E_{\text{ch}} = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \Delta e_1$$

$$E_{\text{tan}} = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \Delta e_1$$

式中  $\Delta F$ ——轴向力变化量，单位为  $\text{N}$ ；

$S_0$ ——试样平行长度的原始横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$\Delta e_1$ ——轴向应变变化量 (%)。

### 2.5.13 泊松比的测定

试验时，用双引伸计同时自动记录方法绘制横向变形-轴向变形 ( $\Delta L_{\text{et}}-\Delta L_{\text{el}}$ ) 曲线，如图 2-40a 所示。在记录的横向变形-轴向变形曲线上，确定弹性直线段，在直线段上读取相距尽量远的  $C$ 、 $D$  两点之间的横向变形增量  $\Delta t$  (单位为  $\text{mm}$ ) 和相应的轴向变形增量  $\Delta l$  (单位为  $\text{mm}$ )，按下式计算泊松比  $\mu$ ：

$$\mu = \left( \frac{\Delta t}{L_{\text{et}}} \right) / \left( \frac{\Delta l}{L_{\text{el}}} \right)$$

式中  $L_{\text{et}}$ ——横向引伸计标距，单位为  $\text{mm}$ ；

$L_{\text{el}}$ ——轴向引伸计标距，单位为  $\text{mm}$ 。

当在同一试验中，泊松比与杨氏模量一起进行测定时，推荐同时绘制轴向力-轴向变形曲线 ( $F-\Delta L_{\text{el}}$ ) 和横向变形-轴向变形曲线 ( $\Delta L_{\text{et}}-\Delta L_{\text{el}}$ )，如图 2-40b 所示。

### 2.5.14 薄板和薄带拉伸应变硬化指数的测定

#### 1. 测量

当在整个均匀塑性应变范围内测定拉伸应变硬化指数  $n$  值时，测量应变的上限应稍小于最大力所对应的塑性应变。当材料呈现单调上升的均匀变形行为 (即材料无明显上、下屈服) 时，测量应变的下限应稍大于测定抗拉强度  $R_m$  的试验速率切换点对应的应变值，如图 2-41 所示。当材料呈现明显屈服 (即材料有上、下屈

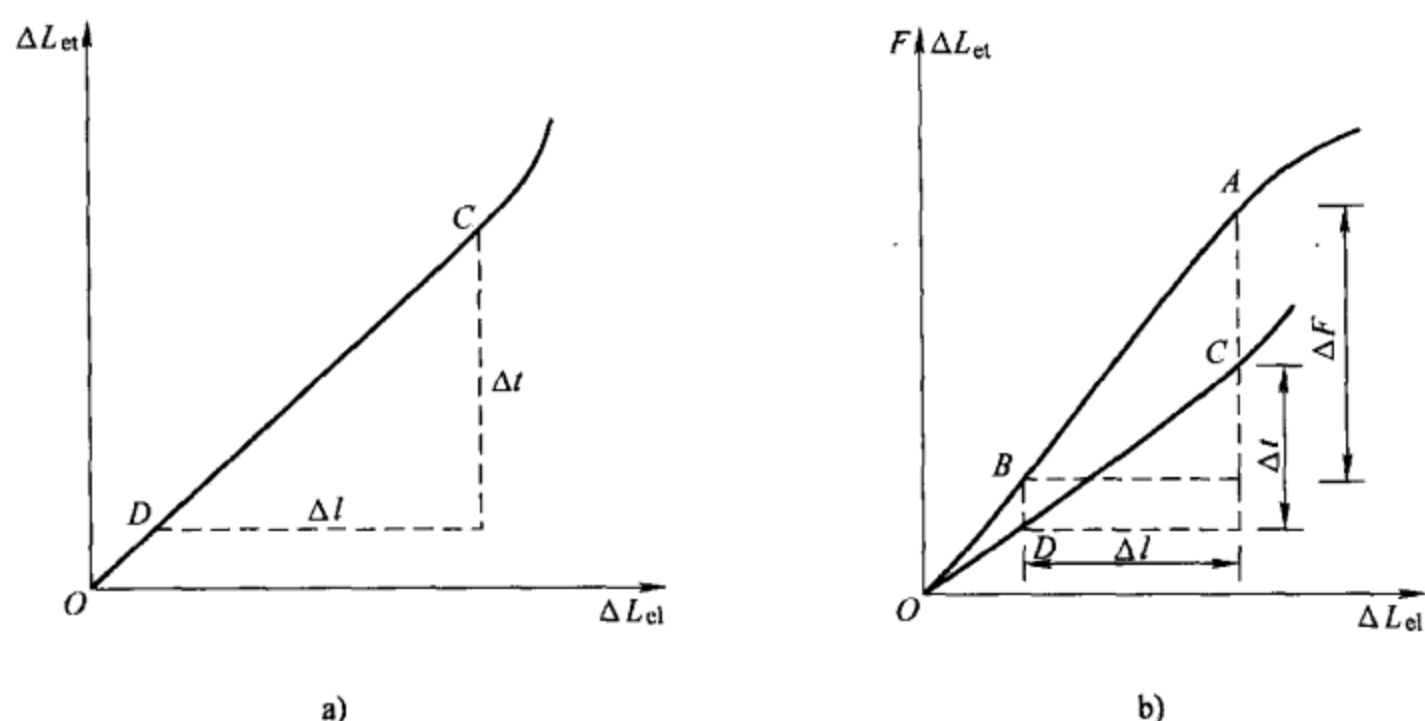
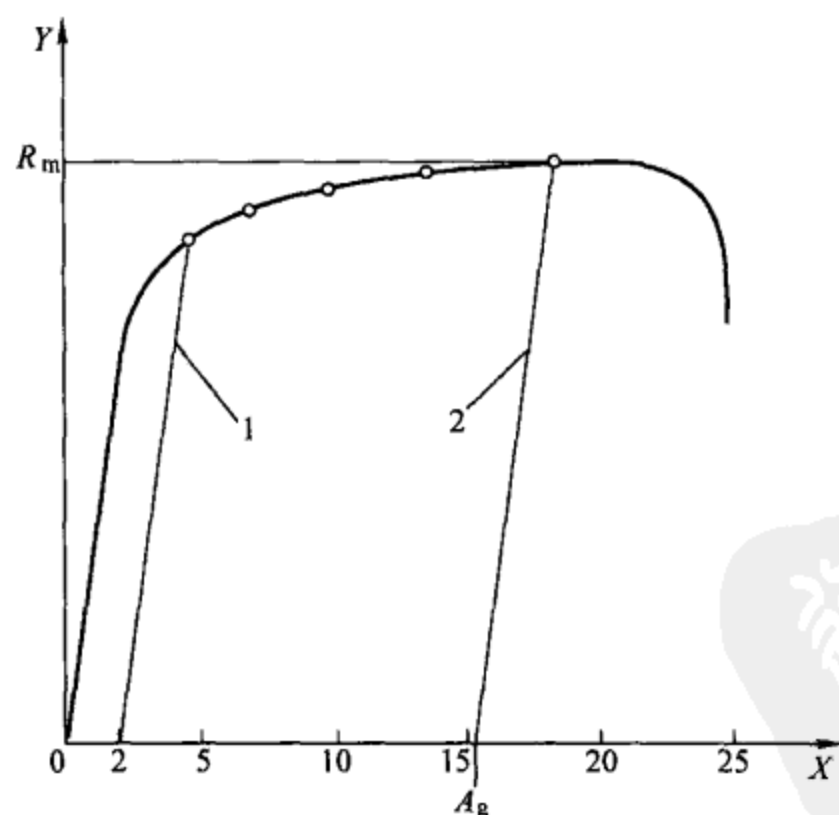


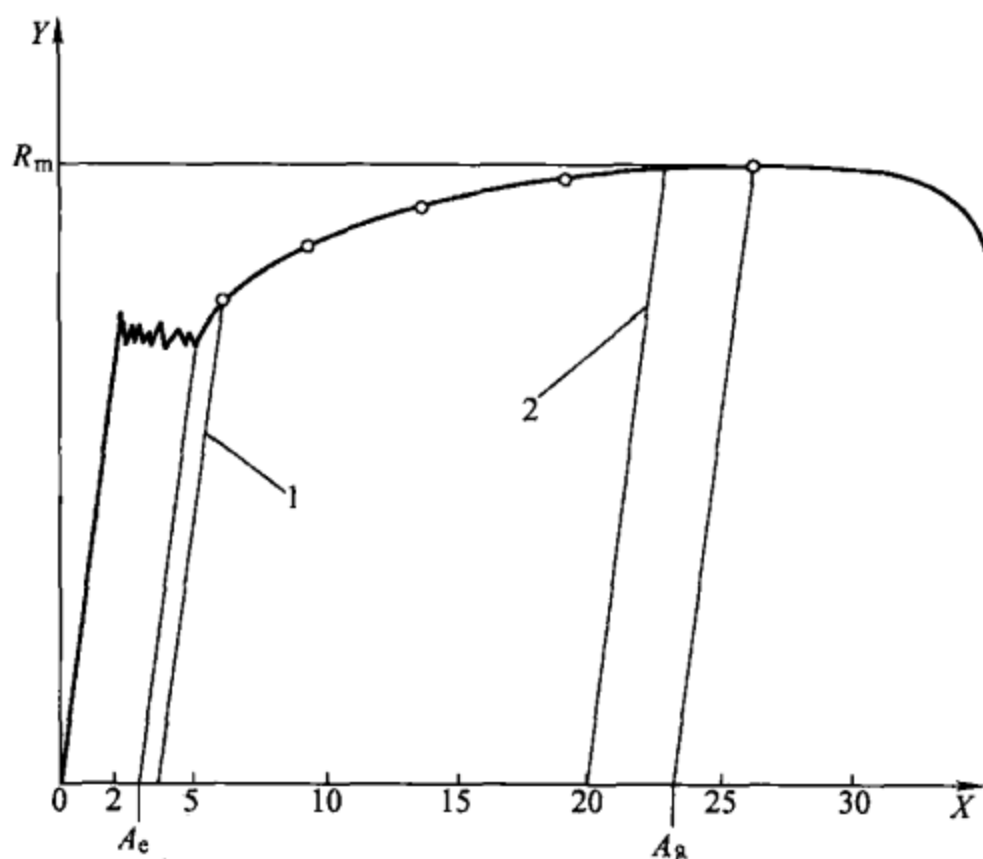
图 2-40 图解法测定泊松比

a) 测定泊松比 b) 测定杨氏模量与泊松比

服强度) 时, 测量应变的下限应稍大于加工硬化起始点和测定  $R_m$  的试验速率切换点对应的应变量, 如图 2-42 和图 2-43 所示。

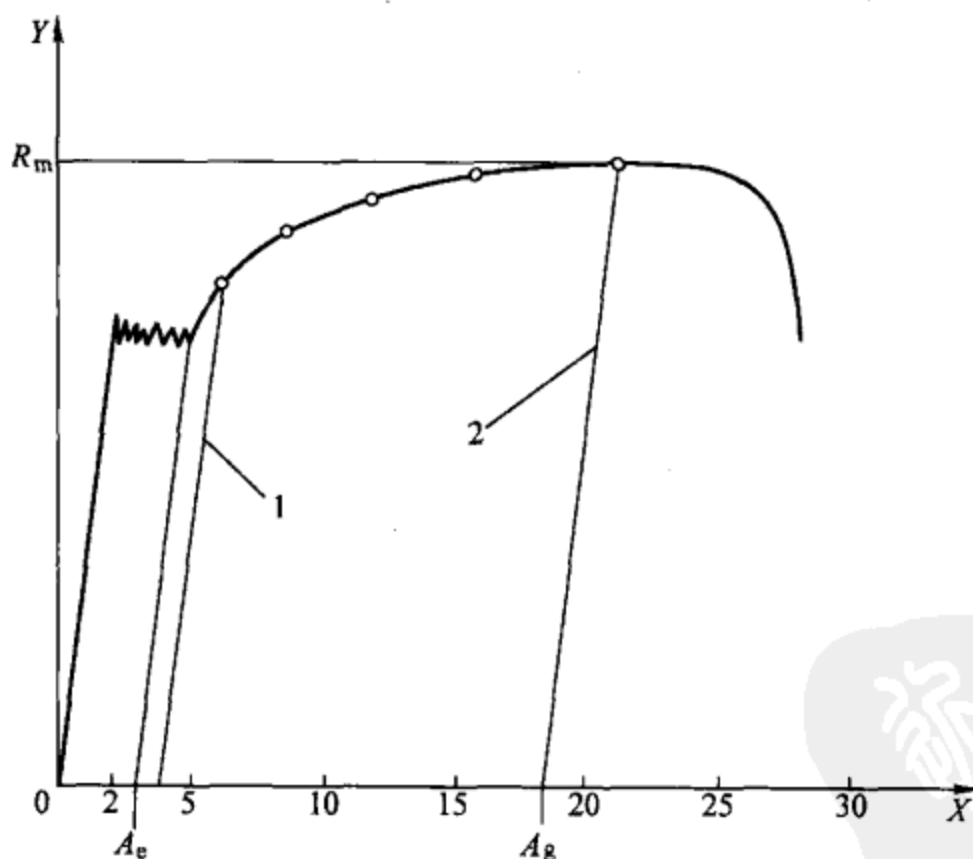
图 2-41  $n_{2-20/A_g}$  或  $n_{2-A_g}$  应变取值范围X—应变 (%) Y—应力 (N/mm<sup>2</sup>) 1—下限 2—上限 $A_g$ —最大塑性延伸率 (%)  $R_m$ —抗拉强度 (N/mm<sup>2</sup>)



图 2-42  $n_{4-20/A_g}$  或  $n_{4-20}$  应变取值范围

$X$ —应变 (%)  $Y$ —应力 ( $\text{N/mm}^2$ ) 1—下限 2—上限

$A_e$ —屈服点延伸率 (%)  $A_g$ —最大塑性延伸率 (%)  $R_m$ —抗拉强度 ( $\text{N/mm}^2$ )

图 2-43  $n_{4-20/A_g}$  或  $n_{4-A_g}$  应变取值范围

$X$ —应变 (%)  $Y$ —应力 ( $\text{N/mm}^2$ ) 1—下限 2—上限

$A_e$ —屈服点延伸率 (%)  $A_g$ —最大塑性延伸率 (%)  $R_m$ —抗拉强度 ( $\text{N/mm}^2$ )

## 2. 计算真实应力 $s$ 和真实塑性应变 $e$

根据试验力和相应的变形值, 采用下式计算真实应力  $s$  (单位为  $\text{N/mm}^2$ ):

$$s = \frac{F}{S_0} \times \frac{L_e \Delta L}{L_e}$$

式中  $F$ ——施加于试样上的瞬时力，单位为 N；

$S_0$ ——试样平行长度的原始横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$L_e$ ——引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L$ ——引伸计标距的瞬时延伸，单位为 mm。

采用下式计算真实塑性应变  $e$ ：

$$e = \ln \left( \frac{L_e + \Delta L}{L_e} - \frac{F}{S_0 m_E} \right)$$

式中  $m_E$ ——应力-应变曲线弹性部分的斜率，单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

采用下式计算拉伸应变硬化指数  $n$ ：

$$s = C \times e^n$$

式中  $C$ ——强度系数，单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

## 2.6 拉伸试样的宏观断口形态

拉伸试样被拉断后的自然表面称为拉伸断口。由于材料中裂纹总是沿着阻力最小的路径扩展，所以断口一般是材料中性能最弱或应力最大部位。断口的形貌、轮廓线和表面粗糙度等特征，真实地记录了断裂的整个过程。因此，分析断口可查明断裂发生的原因，为分析断裂过程提供依据，并且可据此分析断裂性质及断裂机制，为改进设计、改善加工工艺、合理选材和用材等提供参考，以防止类似事故再次发生。

宏观断口是指用肉眼、放大镜或低倍显微镜所观察到的断口形貌。宏观断口分析是一种非常简便而又实用的分析方法，在断裂事故分析中总是首先进行宏观断口分析。从宏观断口分析中，大体上可以判断出断裂的类型（韧性断裂、脆性断裂、疲劳断裂），同时也可以大体上找出裂纹源位置和裂纹扩展途径，并粗略地找出破坏原因。

光滑圆柱拉伸试样宏观韧塑断口呈杯锥形，它由纤维区、放射区和剪切唇三个区域（即断口特征三要素）组成，如图 2-44 所示。杯锥状断口形成过程如图 2-45 所示。

(1) 纤维区 对光滑圆柱试样来说，纤维区位于断口中央，呈粗糙的纤维状圆柱形花样。当拉伸载荷达到拉伸曲线最高点时，便在试样局部地区产生颈缩。同时，试样应力状态也由单向变为三向，且中心应力最大。在三向拉应力作用下，塑性变形难以进行，致使中心部分的夹杂物或第二相质点本身碎裂，或夹杂物质点与基体界面脱离形成微孔。在外加载荷作用下，微孔不断长大和聚合就形成了微裂

纹。早期形成的显微裂纹，其端部产生较大塑性变形，且集中于极窄的高形变带内。这些剪切变形带大致与横向呈  $45^\circ$ 。这说明纤维区的形成实质上是在切应力作用下，塑性变形过程中的微裂纹不断扩展和相互连接造成的。新的微孔就在变形带内成核、长大并聚集，当与裂纹连接时，裂纹便向前扩展一段距离。这一过程重复进行就形成锯齿形的纤维区。纤维区所在平面垂直于拉伸应力方向。裂纹在纤维区扩展是很慢的，当裂纹达到临界尺寸后，便快速扩展而形成放射区。

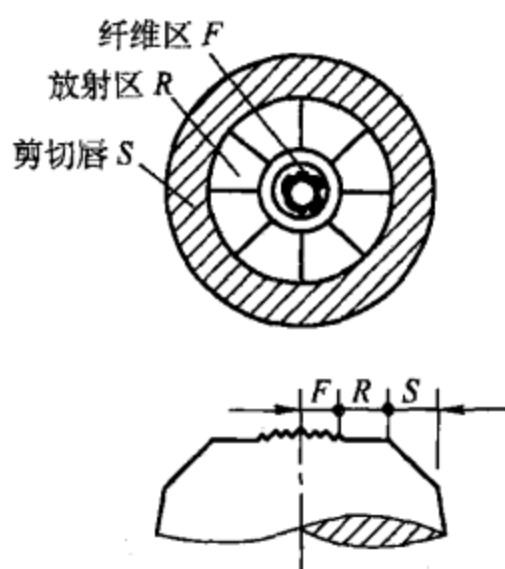


图 2-44 拉伸断口的三个区域

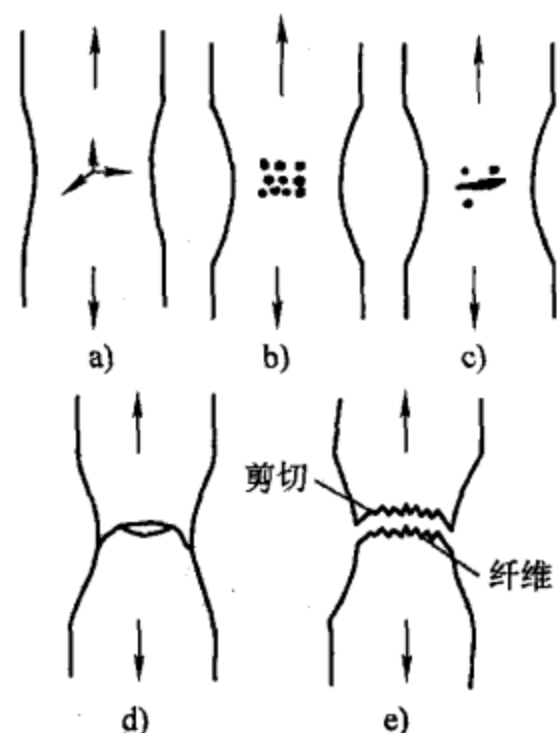


图 2-45 杯锥状断口形成过程

- a) 缩颈导致三向应力 b) 显微孔洞形成 c) 孔洞长大  
d) 孔洞连接形成锯齿状 e) 边缘剪切断裂

(2) 放射区 紧接纤维区的是放射区，该区有放射花样特征。纤维区与放射区交界线标志着裂纹由缓慢向快速扩展的转化。放射线平行于裂纹扩展方向，而且垂直裂纹前端轮廓线，并逆指向裂纹起始点。放射花样也是由材料的剪切变形所造成的，不过它与纤维区的剪切断裂不同，是在裂纹达到临界尺寸后作快速低能量撕裂的结果。这时材料的宏观塑性变形量很小，表现为脆性断裂。但在微观局部区域，仍有很大的塑性变形。因此，放射花样是剪切型的低能量撕裂的一种标志。

(3) 剪切唇 它在撕裂过程的最后阶段形成。其表面平滑，与拉应力方向呈  $45^\circ$ ，通常称为“拉边”。在剪切唇区域内，裂纹也是作快速扩展。此时裂纹是在平面应力状态下失稳扩展，材料的塑性变形量很大，属于韧性断裂区。

# 第 3 章 金属材料的硬度

## 3.1 硬度相关知识

### 3.1.1 硬度及硬度试验的定义

硬度是指材料抵抗局部变形（特别是塑性变形）、压痕或划痕的能力。

硬度试验是应用最广泛的力学性能试验，根据受力方式，可分为压入法和刻划法。在压入法中，按照加力速度不同又可分为静态力试验法和动态力试验法。通常所采用的布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等均属于静态力试验法，肖氏硬度、里氏硬度和锤击布氏硬度等属于动态力试验法。各种不同硬度试验方法适用范围如表 3-1 所示。

表 3-1 不同硬度试验方法适用范围

硬度测量方法	适用范围
布氏硬度试验	测量晶粒粗大且组织不均的零件,对成品件不宜采用。钢铁件的硬度检验中,现已逐渐采用硬质合金球压头测量退火件、正火件、调质件、铸件和锻件的硬度
洛氏硬度试验	批量、成品件及半成品件的硬度检验。对晶粒粗大且组织不均的零件不宜采用。A 标尺适于测量高硬度淬火件、较小与较薄件的硬度,以及具有中等厚度硬化层零件的表面硬度。B 标尺适于测量硬度较低的退火件、正火件及调质件。C 标尺适于测量经淬火回火等处理零件的硬度,以及具有较厚硬化层零件的表面硬度
表面洛氏硬度试验	测量薄件、小件的硬度以及具有薄或中等厚度硬化层零件的表面硬度。钢铁件硬度检验中一般用 N 标尺
维氏硬度试验	钢铁件硬度检验中,试验力一般不超过 294.2N。主要用于测量小件、薄件的硬度,以及具有浅或中等厚度硬化层零件的表面硬度
小载荷维氏硬度试验	测量小件、薄件的硬度,以及具有浅硬化层零件的表面硬度。测定表面硬化零件的表层硬度梯度或硬化层深度
显微维氏硬度试验	测量微小件、极薄件或显微组织的硬度,以及具有极端或极硬硬化层零件的表面硬度
肖氏硬度试验	主要用于大件的现场硬度检验,例如轧辊、机床面、重型构件等
钢的锉刀硬度检验	形状复杂零件、大件等的现场硬度检验。批量零件的 100% 硬度检验。被检面的硬度应不低于 40HRC

(续)

硬度测量方法	适用范围
努氏硬度试验	实际检验中,试验力一般不超过 9.807N。主要用于测量微小件、极薄件或显微组织的硬度,以及具有极薄或极硬硬化层零件的表面硬度
里氏硬度试验	大件、组装件、形状较复杂零件等的现场硬度检验
超声硬度试验	大件、组装件、形状较复杂零件、薄件、氮化件等的现场硬度检验
锤击式布氏硬度试验	正火、退火或调质处理大件及原材料的现场硬度检验

### 3.1.2 硬度试验常用术语

(1) 布氏硬度 (HBW) 材料抵抗通过硬质合金球压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

(2) 努氏硬度 (HK) 材料抵抗通过金刚石菱形锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

(3) 肖氏硬度 (HS) 应用弹性回跳法将撞销 (具有尖端的小锥, 尖端上常镶有金刚钻) 从一定高度落到所测试材料的表面上而发生回跳, 用测得的撞销回跳的高度来表示的硬度。

(4) 洛氏硬度 (HR) 材料抵抗通过硬质合金, 或对应某一标尺的金刚石圆锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

(5) 维氏硬度 (HV) 材料抵抗通过金刚石正四棱锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

(6) 里氏硬度 (HL) 将规定质量的冲击体, 在弹性力作用下以一定速度冲击试样表面, 用冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算的硬度值。

(7) 标准块 用于压痕硬度计间接检验、带有检定合格的压痕值的标准块状物质。

## 3.2 硬度试样的制备

### 3.2.1 试样的一般要求

- 1) 试样表面应光滑平坦, 无氧化皮及外来污物, 尤其不应有油脂。
- 2) 试样的制备应使受热或冷加工等因素对表面硬度的影响减至最小。
- 3) 试验后试样背面不应出现可见变形。

### 3.2.2 洛氏硬度试样

- 1) 试样表面粗糙度  $Ra$  不大于  $0.8\mu\text{m}$ 。

2) 对于用金刚石圆锥压头进行的试验, 试样或试验层厚度应不小于残余压痕深度的 10 倍; 对于用球压头进行的试验, 试样或试验层的厚度应不小于残余压痕深度的 15 倍。洛氏硬度与试样最小厚度的关系如图 3-1 所示。

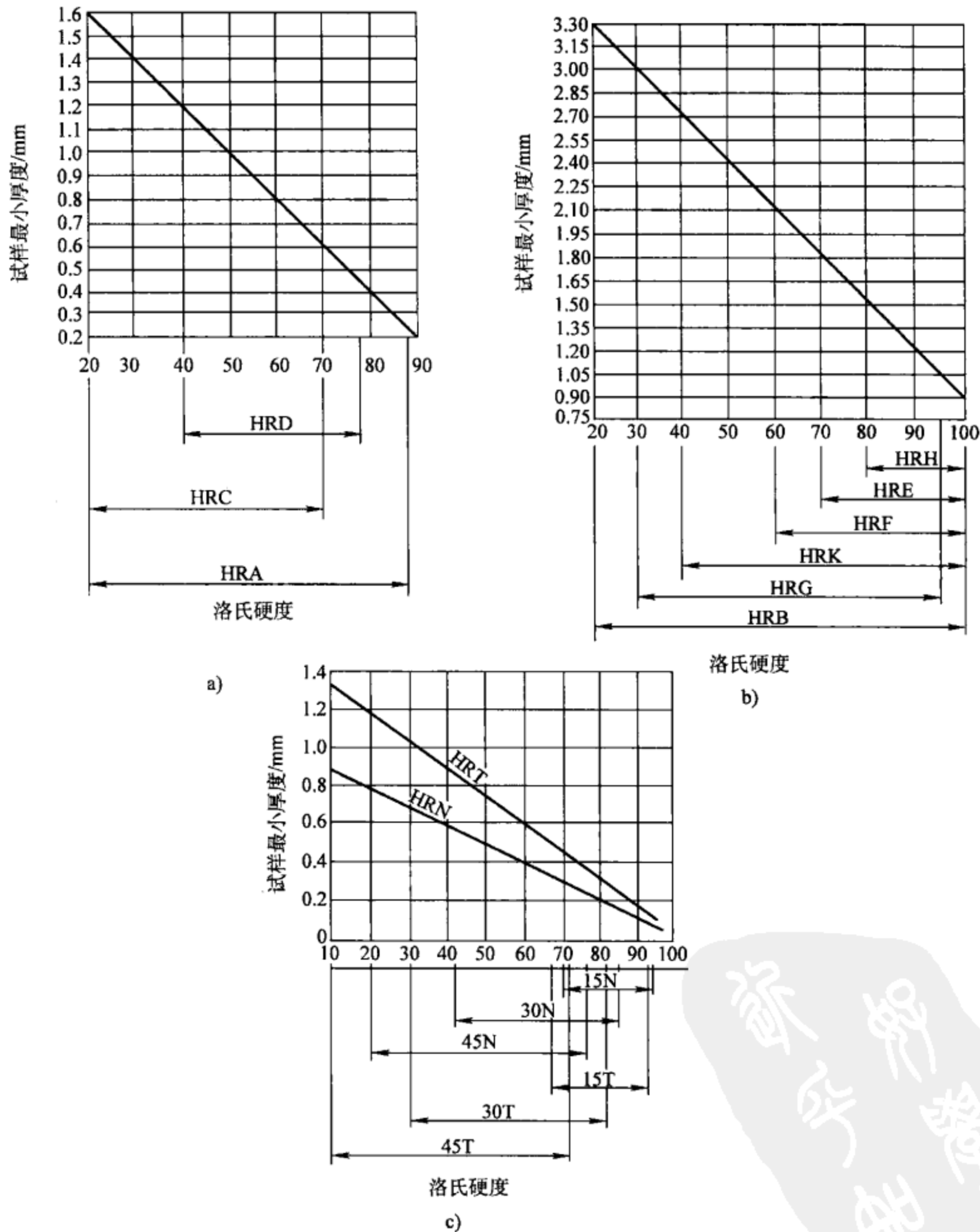


图 3-1 洛氏硬度与试样最小厚度关系

a) 用金刚石圆锥压头试验 (A、C 和 D 标尺)    b) 用球压头试验 (B、E、F、G、H 和 K 标尺)  
c) 表面洛氏硬度试验 (N 和 T 标尺)



### 3.2.3 布氏硬度试样

1) 表面粗糙度  $Ra$  一般不大于  $1.6\mu\text{m}$ 。

2) 试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍。试样最小厚度与压痕平均直径的关系如表 3-2 所示, 试样背后如出现可见变形, 则表明试样太薄。

表 3-2 压痕平均直径与试样最小厚度关系表

(单位: mm)

压痕平均直径 $d$	试样最小厚度			
	球直径			
	$D=1$	$D=2.5$	$D=5$	$D=10$
0.2	0.08			
0.3	0.18			
0.4	0.33			
0.5	0.54			
0.6	0.8	0.29		
0.7		0.4		
0.8		0.53		
0.9		0.67		
1		0.83		
1.1		1.02		
1.2		1.23	0.58	
1.3		1.46	0.69	
1.4		1.72	0.8	
1.5		2	0.92	
1.6			1.05	
1.7			1.19	
1.8			1.34	
1.9			1.5	
2			1.67	
2.2			2.04	
2.4			2.46	1.17
2.6			2.92	1.38
2.8			3.43	1.6
3			4	1.84
3.2				2.1
3.4				2.38
3.6				2.68
3.8				3
4				3.34
4.2				3.7
4.4				4.08
4.6				4.48
4.8				4.91
5				5.36
5.2				5.83
5.4				6.33
5.6				6.86
5.8				7.42
6				8

### 3.2.4 维氏硬度试样

1) 试样表面的质量应能保证压痕对角线长度的精确测量, 表面粗糙度符合表 3-3 的要求。

表 3-3 维氏硬度表面粗糙度值要求

试样类型	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m} \leq$
维氏硬度试样	0.4
小负荷维氏硬度试样	0.2
显微维氏硬度试样	0.1

2) 试样或试验层厚度至少应为压痕对角线长度的 1.5 倍。试样最小厚度图如图 3-2 所示。该图的使用方法为: 将右边标尺选定的试验力和左边标尺硬度值作一连接线, 此连接线与中间标尺的交点示出的值为该条件下的试样最小厚度。

### 3.2.5 努氏硬度试样

由于努氏硬度压痕很浅, 制备试样时应采取相应措施。对于小横截面或形状不规则的试样, 可使用专用支承台, 例如, 在塑料中镶嵌等。

### 3.2.6 肖氏硬度试样

1) 试样的试验面一般为平面, 对于曲面试样, 其试验面的曲率半径应不小于 32mm。

2) 试样的质量应至少在 0.1kg 以上。

3) 试样应有足够的厚度, 以保证测量的硬度值不受试验工作台硬度的影响。试样的厚度一般应在 10mm 以上。

4) 试样的试验面积应尽可能大, 试样两相邻压痕中心距离应不小于 1mm, 压痕中心距试样边缘的距离不应小于 4mm。

5) 对于肖氏硬度小于 50HS 的试样, 表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $1.6\mu\text{m}$ ; 肖氏硬度大于 50HS 时, 表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $0.8\mu\text{m}$ 。

6) 试样不应带有磁性。

### 3.2.7 里氏硬度试样

1) 试样表面粗糙度应符合表 3-4 的规定。

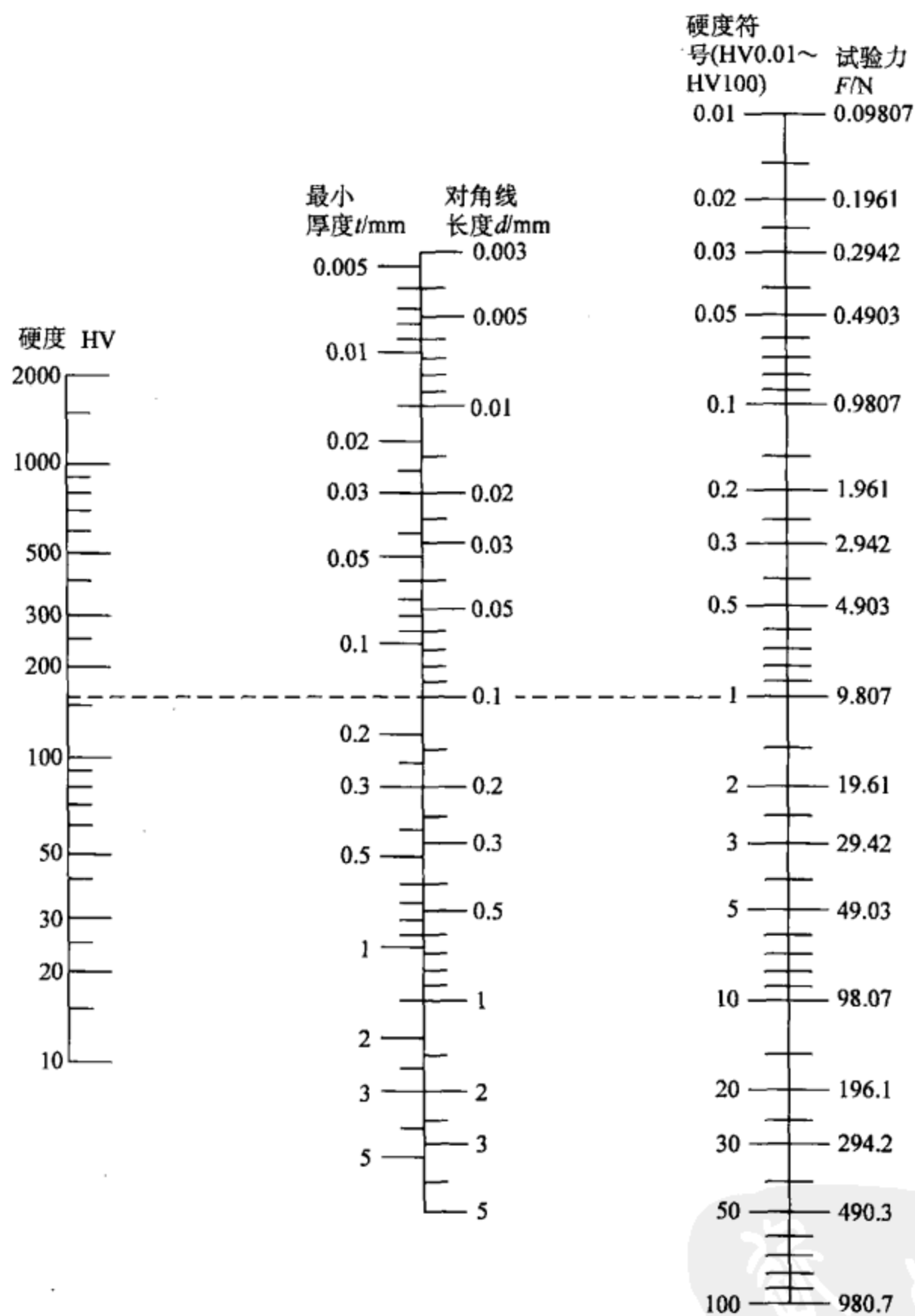


图 3-2 试样最小厚度图 (HV0.01 ~ HV100)

表 3-4 试样表面粗糙度

冲击装置类型	试样表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m} \leq$
D、DC 型	1.6
G 型	6.3
C 型	0.4

2) 试样必须有足够的质量及刚性,以保证在冲击过程中不产生位移或弹动,试样的质量应符合表 3-5 的规定。

表 3-5 试样的质量

冲击装置类型	试样质量/kg		
	稳定放置	固定或夹持	需耦合
D、DC 型	>5	2~5	0.05~2
G 型	>15	5~15	0.5~5
C 型	>1.5	0.5~1.5	0.02~0.5

3) 试样应具有足够的厚度,试样最小厚度应符合表 3-6 规定。

表 3-6 试样的最小厚度

冲击装置类型	试样最小厚度/mm
D、DC 型	5
G 型	10
C 型	1

4) 对于具有表面硬化层的试样,硬化层深度应符合表 3-7 规定。

表 3-7 硬化层深度

冲击装置类型	表面硬化层深度/mm $\geq$
D、DC 型	0.8
C 型	0.2

5) 对于凹、凸圆柱面及球面试样,其表面曲率半径应符合表 3-8 规定。

表 3-8 试样表面曲率半径

冲击装置类型	表面曲率半径/mm $\geq$
D、DC 型	30
G 型	50

6) 对于表面为曲面的试样,应使用适当的支撑环,以保证冲头冲击瞬间位置偏差在  $\pm 0.5\text{mm}$  之内。

### 3.3 硬度计

#### 3.3.1 洛氏硬度计

洛氏硬度计分为手动洛氏硬度计、电动洛氏硬度计、数显洛氏硬度计、表面类

洛氏硬度计、光学类洛氏硬度计和加高型洛氏硬度计。手动洛氏硬度计试验操作简单，测量迅速，可在指示表上直接读取硬度值，工作效率高，是最常用的硬度试验方法。由于试验力较小，压痕也小，特别是表面洛氏硬度试验的压痕更小，对大多数工件的使用无影响，可直接测试成品工件。初试验力的采用，使得试样表面轻微的平面度误差对硬度值的影响较小，非常适于在工厂使用，适于对成批加工的成品或半成品工件进行逐件检测。该试验方法对测量操作的要求不高，非专业人员容易掌握。洛氏硬度计如图 3-3 所示。

### 3.3.2 布氏硬度计

布氏硬度试验的优点是硬度代表性好，由于通常采用的是 10mm 直径球压头，294.2kN (3000kgf) 试验力，其压痕面积较大，能反映较大范围内金属各组成相综合影响的平均值，而不受个别组成相及微小不均匀度的影响，因此特别适用于测定灰铸铁、轴承合金和具有粗大晶粒的金属材料。它的试验数据稳定，重现性好，精度高于洛氏硬度，低于维氏硬度。此外，布氏硬度值与抗拉强度值之间存在较好的对应关系。

布氏硬度试验的特点是压痕较大，成品检验有困难，试验过程比洛氏硬度试验复杂，测量操作和压痕测量都比较费时。由于压痕边缘的凸起、凹陷或圆滑过渡都会使压痕直径的测量产生较大误差，因此要求操作者具有熟练的试验技术和丰富的工作经验，一般要求由专门的试验员操作。布氏硬度计如图 3-4 所示。

### 3.3.3 维氏硬度计和努氏硬度计

维氏硬度计分为普通维氏硬度计、小负荷维氏硬度计和显微维氏硬度计。普通维氏硬度计一般指载荷在 98.1 ~ 490.4N (10 ~ 50kgf) 的维氏硬度试验机，小负荷维氏硬度计一般指最大载荷为 49.04N (5kgf) 的维氏硬度试验机，显微维氏硬度计一般指最大载荷为 9.81N (1kgf) 的维氏硬度试验机。

维氏硬度计试验测量范围宽广，可以测量目前工业上所用到几乎全部金属材料，从很软的材料（几个维氏硬度单位）到很硬的材料（3000 个维氏硬度单位）都可测量。维氏硬度试验主要用于材料研究和科学试验方面，小负荷维氏硬度试验主要用于测试小型精密零件的硬度、表面硬化层硬度和有效硬化层深度、镀层的表



图 3-3 洛氏硬度计

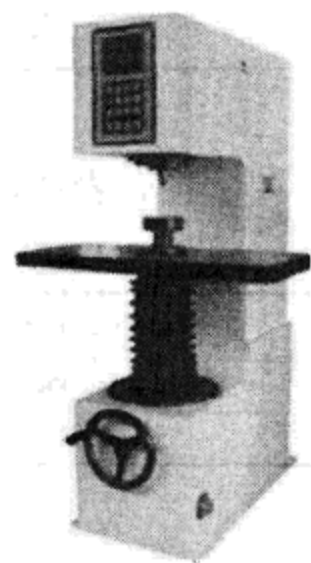


图 3-4 布氏硬度计

面硬度、薄片材料和细线材的硬度、刀刃附近的硬度、牙科材料的硬度等。由于试验力很小，压痕也很小，试样外观和使用性能都可以不受影响。显微维氏硬度试验主要用于金属学和金相学研究，用于测定金属组织中各组成相的硬度、研究难熔化合物脆性等，显微维氏硬度试验还用于极小或极薄零件的测试，零件厚度可薄至  $3\mu\text{m}$ 。

维氏硬度计试验最大的优点在于其硬度值与试验力的大小无关，只要是硬度均匀的材料，可以任意选择试验力，其硬度值不变。这就相当于在一个很宽广的硬度范围内具有一个统一的标尺。维氏硬度试验是常用硬度试验方法中精度最高的，同时它的重复性也很好。维氏硬度计如图 3-5 所示。

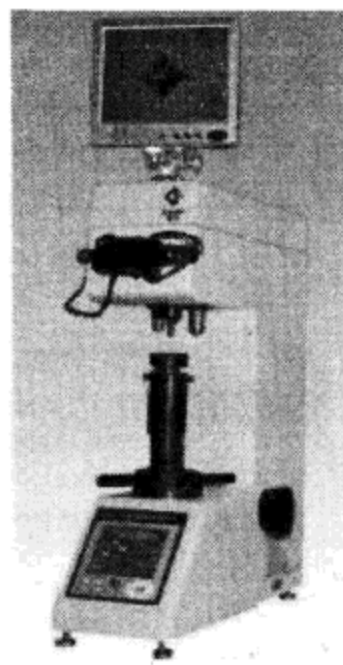


图 3-5 维氏硬度计

努氏硬度试验没有专门的硬度计，通常是共用显微维氏硬度计，只要更换压头并改变硬度值的算法即可。

### 3.3.4 肖氏硬度计

肖氏硬度计适用于测定金属材料的肖氏硬度值。肖氏硬度计便于携带，特别适用于冶金、重型机械行业的中大型工件，例如大型构件、铸件、锻件、曲轴、轧辊、特大型齿轮、机床导轨等工件。在橡胶、塑料行业中常称作邵氏硬度。与其他硬度计相比，准确度稍差，受测试时的垂直性、试样表面粗糙度等因素的影响，数据分散性较大，其测试结果的比较只限于弹性模量相同的材料。它对试样的厚度和质量都有一定要求，不适于较薄和较小试样，但是它是一种轻便的手提式仪器，便于现场测试，其结构简单，便于操作，测试效率高。肖氏硬度计如图 3-6 所示。

### 3.3.5 里氏硬度计

里氏硬度计是一种新型的硬度测试仪器，具有测试精度高、体积小、操作容易、携带方便、测量范围宽的特点。它可将测得的硬度值自动转换成布氏、洛氏、维氏、肖氏等硬度值，并打印记录，还可配置适合于各种测试场合的配件。里氏硬度计可以满足于各种测试环境和条件。

便携式里氏硬度计广泛应用于已安装的机械或永久性组装部件、轴承及其他零件、压力容器、汽轮发电机组及其设备的失效分析、重型工件、试验空间很狭小的工件、要求对测试结果有正规的原始记录、金属材料仓库的材料区分、大型工件大范围内多处测量部位的快速检验。里氏硬度计如图 3-7 所示。



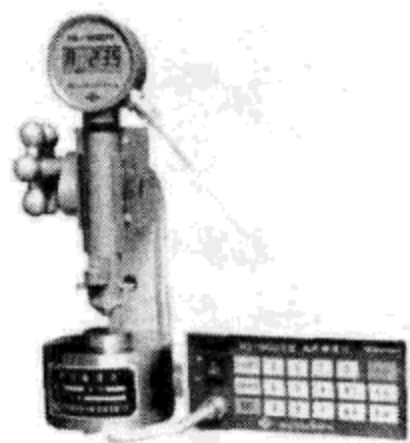


图 3-6 肖氏硬度计



图 3-7 里氏硬度计

3.4 试验要求

- 1) 试验温度一般为 10 ~ 35℃。对于温度要求严格的试验，应控制在 (23 ± 5)℃ 之内。
- 2) 试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。
- 3) 试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。
- 4) 每个试样上的试验点数不少于 4 点，第 1 点不计。
- 5) 在大量试验前或距前一试验超过 24h，以及压头或支承台移动或重新安装后，均应进行检定，上述调整后的第一次试验结果不作为正式数据。

3.5 硬度的测定

3.5.1 洛氏硬度的测定

1. 洛氏硬度标尺

洛氏硬度标尺及适用范围如表 3-9 所示。

表 3-9 洛氏硬度标尺及适用范围

洛氏硬度 标尺	硬度符号	压头类型	初试验力 $F_0/N$	主试验 $F_1/N$	总试验力 $F/N$	适用范围
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	588.4	20HRA ~ 88HRA
B	HRB	直径 1.5875mm 球	98.07	882.6	980.7	20HRB ~ 100HRB
C	HRC	金刚石圆锥	98.07	1373	1471	20HRC ~ 70HRC
D	HRD	金刚石圆锥	98.07	882.6	980.7	40HRD ~ 77HRD

(续)

洛氏硬度 标尺	硬度符号	压头类型	初试验力 $F_0/\text{N}$	主试验 $F_1/\text{N}$	总试验力 $F/\text{N}$	适用范围
E	HRE	直径 3.175mm 球	98.07	882.6	980.7	70HRE ~ 100HRE
F	HRF	直径 1.5875mm 球	98.07	490.3	588.4	60HRF ~ 100HRF
G	HRG	直径 1.5875mm 球	98.07	1373	1471	30HRG ~ 94HRG
H	HRH	直径 3.175mm 球	98.07	490.3	588.4	80HRH ~ 100HRH
K	HRK	直径 3.175mm 球	98.07	1373	1471	40HRK ~ 100HRK
15N	HR15N	金刚石圆锥	29.42	117.7	147.1	70HR15N ~ 94HR15N
30N	HR30N	金刚石圆锥	29.42	264.8	294.2	42HR30N ~ 86HR30N
45N	HR45N	金刚石圆锥	29.42	411.9	441.3	20HR45N ~ 77HR45N
15T	HR15T	直径 1.5875mm 球	29.42	117.7	147.1	67HR15T ~ 93HR15T
30T	HR30T	直径 1.5875mm 球	29.42	264.8	294.2	29HR30T ~ 82HR30T
45T	HR45T	直径 1.5875mm 球	29.42	411.9	441.3	10HR45T ~ 72HR45T

2. 洛氏硬度试验原理

1) 将压头（金刚石圆锥或硬质合金球）按图 3-8 分两个步骤压入试样表面，经规定保持时间后，卸除主试验力  $F$ ，测量在初试验力  $F_0$  下的残余压痕深度  $h$ 。

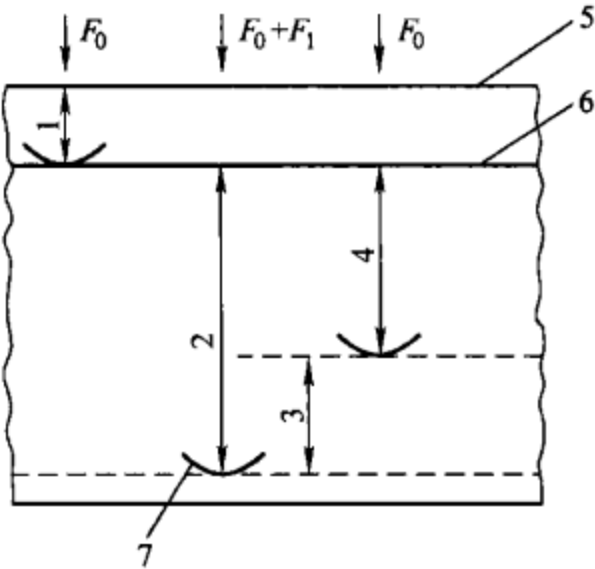


图 3-8 洛氏硬度试验原理图

$F_0$ —初试验力  $F_1$ —主试验力 1—在  $F_0$  下的压入深度 2—由  $F_1$  引起的压入深度  
3—卸除  $F_1$  后弹性回复深度 4—残余压痕深度  $h$  5—试样表面 6—测量基准面 7—压头位置

2) 用下式计算洛氏硬度：

洛氏硬度 =  $N - \frac{h}{S}$

(3-1)

式中  $N$ ——给定标尺的硬度数，对于 A、C、D、N 和 T 标尺， $N$  取 100，对于 B、E、F、G、H 和 K 标尺， $N$  取 130；  
 $h$ ——残余压痕深度，单位为 mm；  
 $S$ ——给定标尺的单位，对于 A、B、C、D、E、F、G、H 和 K 标尺， $S$  取 0.002，对于 N 和 T 标尺， $S$  取 0.001。

### 3. 硬度值的表示

1) A、C 和 D 标尺洛氏硬度用硬度值、符号 HR、使用的标尺字母表示。如 56HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 56。

2) B、E、F、G、H 和 K 标尺洛氏硬度用硬度值、符号 HR、使用的标尺和球压头代号（硬质合金球为 W）表示，如 62HRBW 表示用硬质合金球压头在 B 标尺上测得的洛氏硬度值为 62。

3) N 标尺表面洛氏硬度用硬度值、符号 HR、试验力数值（总试验力）和使用的标尺表示，如 60HR30N 表示用总试验力为 294.2N 的 30N 标尺测得的表面洛氏硬度值为 60。

4) T 标尺表面洛氏硬度用硬度值、符号 HR、试验力数值（总试验力）、使用的标尺和压头代号表示，如 35HR30TW 表示用硬质合金球压头在总试验力为 294.2N 的 30T 标尺测得的表面洛氏硬度值为 35。

### 4. 试验程序

1) 使压头与试样表面接触，无冲击和振动地施加初试验力  $F_0$ ，初试验力保持时间不应超过 3s。

2) 无冲击和振动地将测量装置调整至基准位置，从初试验力  $F_0$  施加至总试验力  $F$  的时间应不小于 1s 且不大于 8s。

3) 总试验力  $F$  保持时间为  $(4 \pm 2)s$ ，然后卸除主试验力  $F_1$ ，保持初试验力  $F_0$ ，经短时间稳定后，进行读数。

4) 洛氏硬度值由残余压痕深度  $h$ ，按式 (3-1) 计算出，通常可从测量装置中直接读数。

5) 两相邻压痕中心之间的距离至少应为压痕直径的 4 倍，并且不应小于 2mm，任一压痕中心距试样边缘的距离至少应为压痕直径的 2.5 倍，并且应不小于 1mm。

### 5. 洛氏硬度的修正

在凸圆柱面上试验时，用金刚石圆锥压头试验（A、C 和 D 标尺）的洛氏硬度修正值如表 3-10 所示，用 1.5875mm 球压头试验（B、F 和 G 标尺）的洛氏硬度修正值如表 3-11 所示，表面洛氏硬度试验（N 标尺）洛氏硬度修正值如表 3-12 所示，表面洛氏硬度试验（T 标尺）洛氏硬度修正值如表 3-13 所示。

表 3-10 用金刚石圆锥压头试验（A、C 和 D 标尺）的洛氏硬度修正值

洛氏硬度读数	洛氏硬度修正值								
	曲率半径/mm								
	3	5	6.5	8	9.5	11	12.5	16	19
20				2.5	2	1.5	1.5	1	1

(续)

洛氏硬度读数	洛氏硬度修正值								
	曲率半径/mm								
	3	5	6.5	8	9.5	11	12.5	16	19
25			3	2.5	2	1.5	1	1	1
30			2.5	2	1.5	1.5	1	1	0.5
35		3	2	1.5	1.5	1	1	0.5	0.5
40		2.5	2	1.5	1	1	1	0.5	0.5
45	3	2	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
50	2.5	2	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
55	2	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0
60	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0
65	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0
70	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0
75	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0
80	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0
85	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0
90	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0

注：大于3HRA、3HRC和3HRD的修正值太大，不在表中规定。

表 3-11 用 1.5875mm 球压头试验（B、F 和 G 标尺）的洛氏硬度修正值

洛氏硬度读数	洛氏硬度修正值							
	曲率半径/mm							
	3	5	6.5	8	9.5	11	12.5	
20				4.5	4	3.5	3	
30			5	4.5	3.5	3	2.5	
40			4.5	4	3	2.5	2.5	
50			4	3.5	3	2.5	2	
60		5	3.5	3	2.5	2	2	
70		4	3	2.5	2	2	1.5	
80	5	3.5	2.5	2	1.5	1.5	1.5	
90	4	3	2	1.5	1.5	1.5	1	
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1	1	0.5	

注：大于5HRB、5HRF和5HRC的修正值太大，不在表中规定。

表 3-12 表面洛氏硬度试验（N 标尺）洛氏硬度修正值

表面洛氏硬度读数	表面洛氏硬度修正值					
	曲率半径/mm					
	1.6	3.2	5	6.5	9.5	12.5
20	(6)	3	2	1.5	1.5	1.5
25	(5.5)	3	2	1.5	1.5	1
30	(5.5)	3	2	1.5	1	1
35	(5)	2.5	2	1.5	1	1
40	(4.5)	2.5	1.5	1.5	1	1
45	(4)	2	1.5	1	1	1
50	(3.5)	2	1.5	1	1	1
55	(3.5)	2	1.5	1	0.5	0.5
60	3	1.5	1	1	0.5	0.5
65	2.5	1.5	1	0.5	0.5	0.5
70	2	1	1	0.5	0.5	0.5
75	1.5	1	0.5	0.5	0.5	0
80	1	0.5	0.5	0.5	0	0
85	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0
90	0	0	0	0	0	0

注：1. 修正值仅为近似值，代表从表中给出曲面上实测平均值。精确至 0.5 个表面洛氏硬度单位。  
2. 圆柱面的试验结果受主轴及 V 形试台与压头同轴度、试样表面粗糙度及圆柱面平直度综合影响。  
3. 对表中其他半径的修正值，可用线性内插法求得。  
4. 括号中的修正值经协商后方可使用。

表 3-13 表面洛氏硬度试验（T 标尺）洛氏硬度修正值

表面洛氏硬度读数	表面洛氏硬度修正值						
	曲率半径/mm						
	1.6	3.2	5	6.5	8	9.5	12.5
20	(13)	(9)	(6)	(4.5)	(3.5)	3	2
30	(11.5)	(7.5)	(5)	(4)	(3.5)	2.5	2
40	(10)	(6.5)	(4.5)	(3.5)	3	2.5	2
50	(8.5)	(5.5)	(4)	3	2.5	2	1.5
60	(6.5)	(4.5)	3	2.5	2	1.5	1.5
70	(5)	(3.5)	2.5	2	1.5	1	1
80	3	2	1.5	1.5	1	1	0.5
90	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5

注：1. 修正值仅为近似值，代表从表中给出曲面上实测平均值。精确至 0.5 个表面洛氏硬度单位。  
2. 圆柱面的试验结果受主轴及 V 形试台与压头同轴度、试样表面粗糙度及圆柱面平直度综合影响。  
3. 对表中其他半径的修正值，可用线性内插法求得。  
4. 括号中的修正值经协商后方可使用。

### 3.5.2 布氏硬度的测定

#### 1. 试验原理

1) 对一定直径  $D$  的硬质合金球施加试验力  $F$ , 使之压入试样表面, 经规定保持时间后, 卸除试验力, 测量试样表面压痕的直径, 如图 3-9 所示。布氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商。

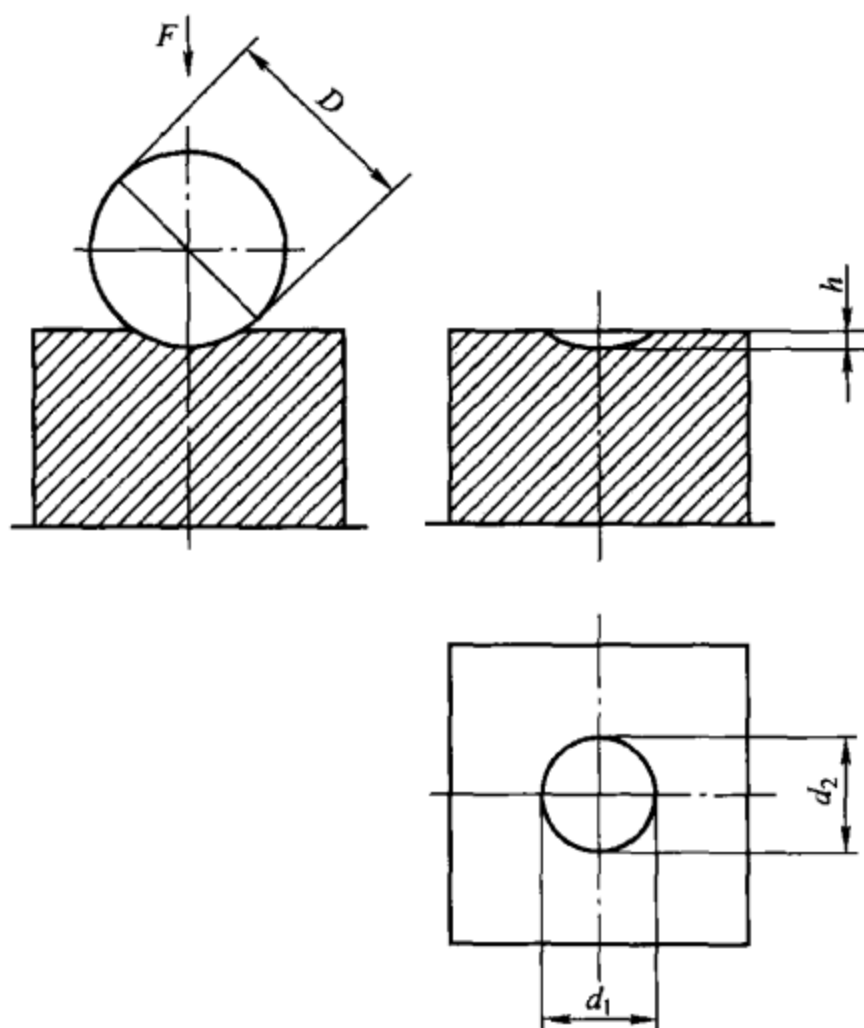


图 3-9 布氏硬度试验原理

2) 布氏硬度的计算如下:

$$\begin{aligned} \text{布氏硬度} &= 0.102 \times \frac{F}{A} = 0.102 \times \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \\ &= \frac{0.204F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \end{aligned}$$

即布氏硬度的计算公式为

$$\text{布氏硬度} = \frac{0.204F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3-2)$$

式中 0.102——试验力单位由 kgf 更换为 N 后需要乘以的系数, 即  $1/g = 1/9.80665 \approx 0.102$  ( $g$  为标准重力加速度);

$F$ ——试验力, 单位为 N;



$A$ ——压痕表面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;

$D$ ——球直径, 单位为  $\text{mm}$ ;

$h$ ——压痕深度, 单位为  $\text{mm}$ ;

$d$ ——压痕平均直径, 单位为  $\text{mm}$ ,  $d = (d_1 + d_2)/2$ ,  $d_1$ 、 $d_2$  为在两个相互垂直方向上测量的压痕直径 (见图 3-9)。

## 2. 硬度值的表示

布氏硬度用符号 HBW 表示。符号 HBW 前面为硬度值, 符号后面的数字依次表示球直径 (单位为  $\text{mm}$ )、试验力数字 (见表 3-14)、与规定时间 (10 ~ 15s) 不同的试验力保持时间。如 350HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球在 7.355kN 试验力下保持 10 ~ 15s 测定的布氏硬度值为 350; 600HBW1/30/20 表示用直径 1mm 的硬质合金球在 294.2N 试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600。

表 3-14 不同条件下的试验力

硬度符号	球直径 $D/\text{mm}$	试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$	试验力 $F/\text{N}$
HBW10/3000	10	30	29420
HBW10/1500	10	15	14710
HBW10/1000	10	10	9807
HBW10/500	10	5	4903
HBW10/250	10	2.5	2452
HBW10/100	10	1	980.7
HBW5/750	5	30	7355
HBW5/250	5	10	2452
HBW5/125	5	5	1226
HBW5/62.5	5	2.5	612.9
HBW5/25	5	1	245.2
HBW2.5/187.5	2.5	30	1839
HBW2.5/62.5	2.5	10	612.9
HBW2.5/31.25	2.5	5	306.5
HBW2.5/15.625	2.5	2.5	153.2
HBW2.5/6.25	2.5	1	61.29
HBW1/30	1	30	294.2
HBW1/10	1	10	98.07
HBW1/5	1	5	49.03
HBW1/2.5	1	2.5	24.52
HBW1/1	1	1	9.807

3. 试验程序

1) 试验力的选择应保证压痕直径在  $0.24D \sim 0.6D$  之间。试验力-压头球直径平方的比率 ( $0.102F/D^2$  比值) 应根据材料和硬度值选择, 如表 3-15 所示。

表 3-15 不同材料的试验力-压头球直径平方的比率

材 料	布氏硬度 HBW	试验力-压头球直径平 方的比率 $0.102F/D^2$	材 料	布氏硬度 HBW	试验力-压头球直径平 方的比率 $0.102F/D^2$
钢、镍合金、钛合金		30	轻金属及合金	<35	2.5
铸铁	<140	10		35~80	5
	≥140	30			10
铜及铜合金	<35	5			15
	35~200	10		>80	10
	>200	30			15
			铅、锡		1

注: 对于铸铁的试验, 压头球直径一般为 2.5mm、5mm 和 10mm。

2) 使压头与试样表面接触, 无冲击和振动地垂直于试样表面施加试验力, 直至达到规定试验力值。从加力开始至施加完全部试验力的时间应在 2~8s 之间。试验力保持时间为 10~15s。对于要求试验力保持时间较长的材料, 试验力保持时间允许误差为  $\pm 2s$ 。

3) 任一压痕中心距试样边缘的距离至少为压痕平均直径的 2.5 倍, 两相邻压痕中心间距离至少为压痕平均直径的 3 倍。

4) 应在两相互垂直方向测量压痕直径, 用两个读数的平均值, 按式 (3-2) 计算布氏硬度。也可以通过表 3-16 查得布氏硬度值。

表 3-16 平面布氏硬度值计算表

球直径 $D/mm$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/N$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
5				7355	—	2452	1226	612.9	245.2
2.5				1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
1				294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/mm$				布氏硬度 HBW					
2.40	1.200	0.6000	0.240	653	327	218	109	54.5	21.8
2.41	1.205	0.6024	0.241	648	324	216	108	54.0	21.6
2.42	1.210	0.6050	0.242	643	321	214	107	53.5	21.4

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
2.43	1.215	0.6075	0.243	637	319	212	106	53.1	21.2
2.44	1.220	0.6100	0.244	632	316	211	105	52.7	21.1
2.45	1.225	0.6125	0.245	627	313	209	104	52.2	20.9
2.46	1.230	0.6150	0.246	621	311	207	104	51.8	20.7
2.47	1.235	0.6175	0.247	616	308	205	103	51.4	20.5
2.48	1.240	0.6200	0.248	611	306	204	102	50.9	20.4
2.49	1.245	0.6225	0.249	606	303	202	101	50.5	20.2
2.50	1.250	0.6250	0.250	601	301	200	100	50.1	20.0
2.51	1.255	0.6275	0.251	597	298	199	99.4	49.7	19.9
2.52	1.260	0.6300	0.252	592	296	197	98.6	49.3	19.7
2.53	1.265	0.6325	0.253	587	294	196	97.8	48.9	19.6
2.54	1.270	0.6350	0.254	582	291	194	97.1	48.5	19.4
2.55	1.275	0.6375	0.255	578	289	193	96.3	48.1	19.3
2.56	1.280	0.6400	0.256	573	287	191	95.5	47.8	19.1
2.57	1.285	0.6425	0.257	569	284	190	94.8	47.4	19.0
2.58	1.290	0.6450	0.258	564	282	188	94.0	47.0	18.8
2.59	1.295	0.6475	0.259	560	280	187	93.3	46.6	18.7
2.60	1.300	0.6500	0.260	555	278	185	92.6	46.3	18.5
2.61	1.305	0.6525	0.261	551	276	184	91.8	45.9	18.4
2.62	1.310	0.6550	0.262	547	273	182	91.1	45.6	18.2
2.63	1.315	0.6575	0.263	543	271	181	90.4	45.2	18.1
2.64	1.320	0.6600	0.264	538	269	179	89.7	44.9	17.9
2.65	1.325	0.6625	0.265	534	267	178	89.0	44.5	17.8
2.66	1.330	0.6650	0.266	530	265	177	88.4	44.2	17.7
2.67	1.335	0.6675	0.267	526	263	175	87.7	43.8	17.5

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
2.68	1.340	0.6700	0.268	522	261	174	87.0	43.5	17.4
2.69	1.345	0.6725	0.269	518	259	173	86.4	43.2	17.3
2.70	1.350	0.6750	0.270	514	257	171	85.7	42.9	17.1
2.71	1.355	0.6775	0.271	510	255	170	85.1	42.5	17.0
2.72	1.360	0.6800	0.272	507	253	169	84.4	42.2	16.9
2.73	1.365	0.6825	0.273	503	251	168	83.8	41.9	16.8
2.74	1.370	0.6850	0.274	499	250	166	83.2	41.6	16.6
2.75	1.375	0.6875	0.275	495	248	165	82.6	41.3	16.5
2.76	1.380	0.6900	0.276	492	246	164	81.9	41.0	16.4
2.77	1.385	0.6925	0.277	488	244	163	81.3	40.7	16.3
2.78	1.390	0.6950	0.278	485	242	162	80.8	40.4	16.2
2.79	1.395	0.6975	0.279	481	240	160	80.2	40.1	16.0
2.80	1.400	0.7000	0.280	477	239	159	79.6	39.8	15.9
2.81	1.405	0.7025	0.281	474	237	158	79.0	39.5	15.8
2.82	1.410	0.7050	0.282	471	235	157	78.4	39.2	15.7
2.83	1.415	0.7075	0.283	467	234	156	77.9	38.9	15.6
2.84	1.420	0.7100	0.284	464	232	155	77.3	38.7	15.5
2.85	1.425	0.7125	0.285	461	230	154	76.8	38.4	15.4
2.86	1.430	0.7150	0.286	457	229	152	76.2	38.1	15.2
2.87	1.435	0.7175	0.287	454	227	151	75.7	37.8	15.1
2.88	1.440	0.7200	0.288	451	225	150	75.1	37.6	15.0
2.89	1.445	0.7225	0.289	448	224	149	74.6	37.3	14.9
2.90	1.450	0.7250	0.290	444	222	148	74.1	37.0	14.8
2.91	1.455	0.7275	0.291	441	221	147	73.6	36.8	14.7
2.92	1.460	0.7300	0.292	438	219	146	73.0	36.5	14.6

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
2.93	1.465	0.7325	0.293	435	218	145	72.5	36.3	14.5
2.94	1.470	0.7350	0.294	432	216	144	72.0	36.0	14.4
2.95	1.475	0.7375	0.295	429	215	143	71.5	35.8	14.3
2.96	1.480	0.7400	0.296	426	213	142	71.0	35.5	14.2
2.97	1.485	0.7425	0.297	423	212	141	70.5	35.3	14.1
2.98	1.490	0.7450	0.298	420	210	140	70.1	35.0	14.0
2.99	1.495	0.7475	0.299	417	209	139	69.6	34.8	13.9
3.00	1.500	0.7500	0.300	415	207	138	69.1	34.6	13.8
3.01	1.505	0.7525	0.301	412	206	137	68.6	34.3	13.7
3.02	1.510	0.7550	0.302	409	205	136	68.2	34.1	13.6
3.03	1.515	0.7575	0.303	406	203	135	67.7	33.9	13.5
3.04	1.520	0.7600	0.304	404	202	135	67.3	33.6	13.5
3.05	1.525	0.7625	0.305	401	200	134	66.8	33.4	13.4
3.06	1.530	0.7650	0.306	398	199	133	66.4	33.2	13.3
3.07	1.535	0.7675	0.307	395	198	132	65.9	33.0	13.2
3.08	1.540	0.7700	0.308	393	196	131	65.5	32.7	13.1
3.09	1.545	0.7725	0.309	390	195	130	65.0	32.5	13.0
3.10	1.550	0.7750	0.310	388	194	129	64.6	32.3	12.9
3.11	1.555	0.7775	0.311	385	193	128	64.2	32.1	12.8
3.12	1.560	0.7800	0.312	383	191	128	63.8	31.9	12.8
3.13	1.565	0.7825	0.313	380	190	127	63.3	31.7	12.7
3.14	1.570	0.7850	0.314	378	189	126	62.9	31.5	12.6
3.15	1.575	0.7875	0.315	375	188	125	62.5	31.3	12.5
3.16	1.580	0.7900	0.316	373	186	124	62.1	31.1	12.4
3.17	1.585	0.7925	0.317	370	185	123	61.7	30.9	12.3

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
3.18	1.590	0.7950	0.318	368	184	123	61.3	30.7	12.3
3.19	1.595	0.7975	0.319	366	183	122	60.9	30.5	12.2
3.20	1.600	0.8000	0.320	363	182	121	60.5	30.3	12.1
3.21	1.605	0.8025	0.321	361	180	120	60.1	30.1	12.0
3.22	1.610	0.8050	0.322	359	179	120	59.8	29.9	12.0
3.23	1.615	0.8075	0.323	356	178	119	59.4	29.7	11.9
3.24	1.620	0.8100	0.324	354	177	118	59.0	29.5	11.8
3.25	1.625	0.8125	0.325	352	176	117	58.6	29.3	11.7
3.26	1.630	0.8150	0.326	350	175	117	58.3	29.1	11.7
3.27	1.635	0.8175	0.327	347	174	116	57.9	29.0	11.6
3.28	1.640	0.8200	0.328	345	173	115	57.5	28.8	11.5
3.29	1.645	0.8225	0.329	343	172	114	57.2	28.6	11.4
3.30	1.650	0.8250	0.330	341	170	114	56.8	28.4	11.4
3.31	1.655	0.8275	0.331	339	169	113	56.5	28.2	11.3
3.32	1.660	0.8300	0.332	337	168	112	56.1	28.1	11.2
3.33	1.665	0.8325	0.333	335	167	112	55.8	27.9	11.2
3.34	1.670	0.8350	0.334	333	166	111	55.4	27.7	11.1
3.35	1.675	0.8375	0.335	331	165	110	55.1	27.5	11.0
3.36	1.680	0.8400	0.336	329	164	110	54.8	27.4	11.0
3.37	1.685	0.8425	0.337	326	163	109	54.4	27.2	10.9
3.38	1.690	0.8450	0.338	325	162	108	54.1	27.0	10.8
3.39	1.695	0.8475	0.339	323	161	108	53.8	26.9	10.8
3.40	1.700	0.8500	0.340	321	160	107	53.4	26.7	10.7
3.41	1.705	0.8525	0.341	319	159	106	53.1	26.6	10.6
3.42	1.710	0.8550	0.342	317	158	106	52.8	26.4	10.6



(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
3.43	1.715	0.8575	0.343	315	157	105	52.5	26.2	10.5
3.44	1.720	0.8600	0.344	313	156	104	52.2	26.1	10.4
3.45	1.725	0.8625	0.345	311	156	104	51.8	25.9	10.4
3.46	1.730	0.8650	0.346	309	155	103	51.5	25.8	10.3
3.47	1.735	0.8675	0.347	307	154	102	51.2	25.6	10.2
3.48	1.740	0.8700	0.348	306	153	102	50.9	25.5	10.2
3.49	1.745	0.8725	0.349	304	152	101	50.6	25.3	10.1
3.50	1.750	0.8750	0.350	302	151	101	50.3	25.2	10.1
3.51	1.755	0.8775	0.351	300	150	100	50.0	25.0	10.0
3.52	1.760	0.8800	0.352	298	149	99.5	49.7	24.9	9.95
3.53	1.765	0.8825	0.353	297	148	98.9	49.4	24.7	9.89
3.54	1.770	0.8850	0.354	295	147	98.3	49.2	24.6	9.83
3.55	1.775	0.8875	0.355	293	147	97.7	48.9	24.4	9.77
3.56	1.780	0.8900	0.356	292	146	97.2	48.6	24.3	9.72
3.57	1.785	0.8925	0.357	290	145	96.6	48.3	24.2	9.66
3.58	1.790	0.8950	0.358	288	144	96.1	48.0	24.0	9.61
3.59	1.795	0.8975	0.359	286	143	95.5	47.7	23.9	9.55
3.60	1.800	0.9000	0.360	285	142	95.0	47.5	23.7	9.50
3.61	1.805	0.9025	0.361	283	142	94.4	47.2	23.6	9.44
3.62	1.810	0.9050	0.362	282	141	93.9	46.9	23.5	9.39
3.63	1.815	0.9075	0.363	280	140	93.3	46.7	23.3	9.33
3.64	1.820	0.9100	0.364	278	139	92.8	46.4	23.2	9.28
3.65	1.825	0.9125	0.365	277	138	92.3	46.1	23.1	9.23
3.66	1.830	0.9150	0.366	275	138	91.8	45.9	22.9	9.18
3.67	1.835	0.9175	0.367	274	137	91.2	45.6	22.8	9.12

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
3.68	1.840	0.9200	0.368	272	136	90.7	45.4	22.7	9.07
3.69	1.845	0.9225	0.369	271	135	90.2	45.1	22.6	9.02
3.70	1.850	0.9250	0.370	269	135	89.7	44.9	22.4	8.97
3.71	1.855	0.9275	0.371	268	134	89.2	44.6	22.3	8.92
3.72	1.860	0.9300	0.372	266	133	88.7	44.4	22.2	8.87
3.73	1.865	0.9325	0.373	265	132	88.2	44.1	22.1	8.82
3.74	1.870	0.9350	0.374	263	132	87.7	43.9	21.9	8.77
3.75	1.875	0.9375	0.375	262	131	87.2	43.6	21.8	8.72
3.76	1.880	0.9400	0.376	260	130	86.8	43.4	21.7	8.68
3.77	1.885	0.9425	0.377	259	129	86.3	43.1	21.6	8.63
3.78	1.890	0.9450	0.378	257	129	85.8	42.9	21.5	8.58
3.79	1.895	0.9475	0.379	256	128	85.3	42.7	21.3	8.53
3.80	1.900	0.9500	0.380	255	127	84.9	42.4	21.2	8.49
3.81	1.905	0.9525	0.381	253	127	84.4	42.2	21.1	8.44
3.82	1.910	0.9550	0.382	252	126	83.9	42.0	21.0	8.39
3.83	1.915	0.9575	0.383	250	125	83.5	41.7	20.9	8.35
3.84	1.920	0.9600	0.384	249	125	83.0	41.5	20.8	8.30
3.85	1.925	0.9625	0.385	248	124	82.6	41.3	20.6	8.26
3.86	1.930	0.9650	0.386	246	123	82.1	41.1	20.5	8.21
3.87	1.935	0.9675	0.387	245	123	81.7	40.9	20.4	8.17
3.88	1.940	0.9700	0.388	244	122	81.3	40.6	20.3	8.13
3.89	1.945	0.9725	0.389	242	121	80.8	40.4	20.2	8.08
3.90	1.950	0.9750	0.390	241	121	80.4	40.2	20.1	8.04
3.91	1.955	0.9775	0.391	240	120	80.0	40.0	20.0	8.00
3.92	1.960	0.9800	0.392	239	119	79.5	39.8	19.9	7.95

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
3.93	1.965	0.9825	0.393	237	119	79.1	39.6	19.8	7.91
3.94	1.970	0.9850	0.394	236	118	78.7	39.4	19.7	7.87
3.95	1.975	0.9875	0.395	235	117	78.3	39.1	19.6	7.83
3.96	1.980	0.9900	0.396	234	117	77.9	38.9	19.5	7.79
3.97	1.985	0.9925	0.397	232	116	77.5	38.7	19.4	7.75
3.98	1.990	0.9950	0.398	231	116	77.1	38.5	19.3	7.71
3.99	1.995	0.9975	0.399	230	115	76.7	38.3	19.2	7.67
4.00	2.000	1.0000	0.400	229	114	76.3	38.1	19.1	7.63
4.01	2.005	1.0025	0.401	228	114	75.9	37.9	19.0	7.59
4.02	2.010	1.0050	0.402	226	113	75.5	37.7	18.9	7.55
4.03	2.015	1.0075	0.403	225	113	75.1	37.5	18.8	7.51
4.04	2.020	1.0100	0.404	224	112	74.7	37.3	18.7	7.47
4.05	2.025	1.0125	0.405	223	111	74.3	37.1	18.6	7.43
4.06	2.030	1.0150	0.406	222	111	73.9	37.0	18.5	7.39
4.07	2.035	1.0175	0.407	221	110	73.5	36.8	18.4	7.35
4.08	2.040	1.0200	0.408	219	110	73.2	36.6	18.3	7.32
4.09	2.045	1.0225	0.409	218	109	72.8	36.4	18.2	7.28
4.10	2.050	1.0250	0.410	217	109	72.4	36.2	18.1	7.24
4.11	2.055	1.0275	0.411	216	108	72.0	36.0	18.0	7.20
4.12	2.060	1.0300	0.412	215	108	71.7	35.8	17.9	7.17
4.13	2.065	1.0325	0.413	214	107	71.3	35.7	17.8	7.13
4.14	2.070	1.0350	0.414	213	106	71.0	35.5	17.7	7.10
4.15	2.075	1.0375	0.415	212	106	70.6	35.3	17.6	7.06
4.16	2.080	1.0400	0.416	211	105	70.2	35.1	17.6	7.02
4.17	2.085	1.0425	0.417	210	105	69.9	34.9	17.5	6.99

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
4.18	2.090	1.0450	0.418	209	104	69.5	34.8	17.4	6.95
4.19	2.095	1.0475	0.419	208	104	69.2	34.6	17.3	6.92
4.20	2.100	1.0500	0.420	207	103	68.8	34.4	17.2	6.88
4.21	2.105	1.0525	0.421	205	103	68.5	34.2	17.1	6.85
4.22	2.110	1.0550	0.422	204	102	68.2	34.1	17.0	6.82
4.23	2.115	1.0575	0.423	203	102	67.8	33.9	17.0	6.78
4.24	2.120	1.0600	0.424	202	101	67.5	33.7	16.9	6.75
4.25	2.125	1.0625	0.425	201	101	67.1	33.6	16.8	6.71
4.26	2.130	1.0650	0.426	200	100	66.8	33.4	16.7	6.68
4.27	2.135	1.0675	0.427	199	99.7	66.5	33.2	16.6	6.65
4.28	2.140	1.0700	0.428	198	99.2	66.2	33.1	16.5	6.62
4.29	2.145	1.0725	0.429	198	98.8	65.8	32.9	16.5	6.58
4.30	2.150	1.0750	0.430	197	98.3	65.5	32.8	16.4	6.55
4.31	2.155	1.0775	0.431	196	97.8	65.2	32.6	16.3	6.52
4.32	2.160	1.0800	0.432	195	97.3	64.9	32.4	16.2	6.49
4.33	2.165	1.0825	0.433	194	96.8	64.6	32.3	16.1	6.46
4.34	2.170	1.0850	0.434	193	96.4	64.2	32.1	16.1	6.42
4.35	2.175	1.0875	0.435	192	95.9	63.9	32.0	16.0	6.39
4.36	2.180	1.0900	0.436	191	95.4	63.6	31.8	15.9	6.36
4.37	2.185	1.0925	0.437	190	95.0	63.3	31.7	15.8	6.33
4.38	2.190	1.0950	0.438	189	94.5	63.0	31.5	15.8	6.30
4.39	2.195	1.0975	0.439	188	94.1	62.7	31.4	15.7	6.27
4.40	2.200	1.1000	0.440	187	93.6	62.4	31.2	15.6	6.24
4.41	2.205	1.1025	0.441	186	93.2	62.1	31.1	15.5	6.21
4.42	2.210	1.1050	0.442	185	92.7	61.8	30.9	15.5	6.18

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
4.43	2.215	1.1075	0.443	185	92.3	61.5	30.8	15.4	6.15
4.44	2.220	1.1100	0.444	184	91.8	61.2	30.6	15.3	6.12
4.45	2.225	1.1125	0.445	183	91.4	60.9	30.5	15.2	6.09
4.46	2.230	1.1150	0.446	182	91.0	60.6	30.3	15.2	6.06
4.47	2.235	1.1175	0.447	181	90.5	60.4	30.2	15.1	6.04
4.48	2.240	1.1200	0.448	180	90.1	60.1	30.0	15.0	6.01
4.49	2.245	1.1225	0.449	179	89.7	59.8	29.9	14.9	5.98
4.50	2.250	1.1250	0.450	179	89.3	59.5	29.8	14.9	5.95
4.51	2.255	1.1275	0.451	178	88.9	59.2	29.6	14.8	5.92
4.52	2.260	1.1300	0.452	177	88.4	59.0	29.5	14.7	5.90
4.53	2.265	1.1325	0.453	176	88.0	58.7	29.3	14.7	5.87
4.54	2.270	1.1350	0.454	175	87.6	58.4	29.2	14.6	5.84
4.55	2.275	1.1375	0.455	174	87.2	58.1	29.1	14.5	5.81
4.56	2.280	1.1400	0.456	174	86.8	57.9	28.9	14.5	5.79
4.57	2.285	1.1425	0.457	173	86.4	57.6	28.8	14.4	5.76
4.58	2.290	1.1450	0.458	172	86.0	57.3	28.7	14.3	5.73
4.59	2.295	1.1475	0.459	171	85.6	57.1	28.5	14.3	5.71
4.60	2.300	1.1500	0.460	170	85.2	56.8	28.4	14.2	5.68
4.61	2.305	1.1525	0.461	170	84.8	56.5	28.3	14.1	5.65
4.62	2.310	1.1550	0.462	169	84.4	56.3	28.1	14.1	5.63
4.63	2.315	1.1575	0.463	168	84.0	56.0	28.0	14.0	5.60
4.64	2.320	1.1600	0.464	167	83.6	55.8	27.9	13.9	5.58
4.65	2.325	1.1625	0.465	167	83.3	55.5	27.8	13.9	5.55
4.66	2.330	1.1650	0.466	166	82.9	55.3	27.6	13.8	5.53
4.67	2.335	1.1675	0.467	165	82.5	55.0	27.5	13.8	5.50

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
4.68	2.340	1.1700	0.468	164	82.1	54.8	27.4	13.7	5.48
4.69	2.345	1.1725	0.469	164	81.8	54.5	27.3	13.6	5.45
4.70	2.350	1.1750	0.470	163	81.4	54.3	27.1	13.6	5.43
4.71	2.355	1.1775	0.471	162	81.0	54.0	27.0	13.5	5.40
4.72	2.360	1.1800	0.472	161	80.7	53.8	26.9	13.4	5.38
4.73	2.365	1.1825	0.473	161	80.3	53.5	26.8	13.4	5.35
4.74	2.370	1.1850	0.474	160	79.9	53.3	26.6	13.3	5.33
4.75	2.375	1.1875	0.475	159	79.6	53.0	26.5	13.3	5.30
4.76	2.380	1.1900	0.476	158	79.2	52.8	26.4	13.2	5.28
4.77	2.385	1.1925	0.477	158	78.9	52.6	26.3	13.1	5.26
4.78	2.390	1.1950	0.478	157	78.5	52.3	26.2	13.1	5.23
4.79	2.395	1.1975	0.479	156	78.2	52.1	26.1	13.0	5.21
4.80	2.400	1.2000	0.480	156	77.8	51.9	25.9	13.0	5.19
4.81	2.405	1.2025	0.481	155	77.5	51.6	25.8	12.9	5.16
4.82	2.410	1.2050	0.482	154	77.1	51.4	25.7	12.9	5.14
4.83	2.415	1.2075	0.483	154	76.8	51.2	25.6	12.8	5.12
4.84	2.420	1.2100	0.484	153	76.4	51.0	25.5	12.7	5.10
4.85	2.425	1.2125	0.485	152	76.1	50.7	25.4	12.7	5.07
4.86	2.430	1.2150	0.486	152	75.8	50.5	25.3	12.6	5.05
4.87	2.435	1.2175	0.487	151	75.4	50.3	25.1	12.6	5.03
4.88	2.440	1.2200	0.488	150	75.1	50.1	25.0	12.5	5.01
4.89	2.445	1.2225	0.489	150	74.8	49.8	24.9	12.5	4.98
4.90	2.450	1.2250	0.490	149	74.4	49.6	24.8	12.4	4.96
4.91	2.455	1.2275	0.491	148	74.1	49.4	24.7	12.4	4.94
4.92	2.460	1.2300	0.492	148	73.8	49.2	24.6	12.3	4.92



(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
4.93	2.465	1.2325	0.493	147	73.5	49.0	24.5	12.2	4.90
4.94	2.470	1.2350	0.494	146	73.2	48.8	24.4	12.2	4.88
4.95	2.475	1.2375	0.495	146	72.8	48.6	24.3	12.1	4.86
4.96	2.480	1.2400	0.496	145	72.5	48.3	24.2	12.1	4.83
4.97	2.485	1.2425	0.497	144	72.2	48.1	24.1	12.0	4.81
4.98	2.490	1.2450	0.498	144	71.9	47.9	24.0	12.0	4.79
4.99	2.495	1.2475	0.499	143	71.6	47.7	23.9	11.9	4.77
5.00	2.500	1.2500	0.500	143	71.3	47.5	23.8	11.9	4.75
5.01	2.505	1.2525	0.501	142	71.0	47.3	23.7	11.8	4.73
5.02	2.510	1.2550	0.502	141	70.7	47.1	23.6	11.8	4.71
5.03	2.515	1.2575	0.503	141	70.4	46.9	23.5	11.7	4.69
5.04	2.520	1.2600	0.504	140	70.1	46.7	23.4	11.7	4.67
5.05	2.525	1.2625	0.505	140	69.8	46.5	23.3	11.6	4.65
5.06	2.530	1.2650	0.506	139	69.5	46.3	23.2	11.6	4.63
5.07	2.535	1.2675	0.507	138	69.2	46.1	23.1	11.5	4.61
5.08	2.540	1.2700	0.508	138	68.9	45.9	23.0	11.5	4.59
5.09	2.545	1.2725	0.509	137	68.6	45.7	22.9	11.4	4.57
5.10	2.550	1.2750	0.510	137	68.3	45.5	22.8	11.4	4.55
5.11	2.555	1.2775	0.511	136	68.0	45.3	22.7	11.3	4.53
5.12	2.560	1.2800	0.512	135	67.7	45.1	22.6	11.3	4.51
5.13	2.565	1.2825	0.513	135	67.4	45.0	22.5	11.2	4.50
5.14	2.570	1.2850	0.514	134	67.1	44.8	22.4	11.2	4.48
5.15	2.575	1.2875	0.515	134	66.9	44.6	22.3	11.1	4.46
5.16	2.580	1.2900	0.516	133	66.6	44.4	22.2	11.1	4.44
5.17	2.585	1.2925	0.517	133	66.3	44.2	22.1	11.1	4.42

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
5.18	2.590	1.2950	0.518	132	66.0	44.0	22.0	11.0	4.40
5.19	2.595	1.2975	0.519	132	65.8	43.8	21.9	11.0	4.38
5.20	2.600	1.3000	0.520	131	65.5	43.7	21.8	10.9	4.37
5.21	2.605	1.3025	0.521	130	65.2	43.5	21.7	10.9	4.35
5.22	2.610	1.3050	0.522	130	64.9	43.3	21.6	10.8	4.33
5.23	2.615	1.3075	0.523	129	64.7	43.1	21.6	10.8	4.31
5.24	2.620	1.3100	0.524	129	64.4	42.9	21.5	10.7	4.29
5.25	2.625	1.3125	0.525	128	64.1	42.8	21.4	10.7	4.28
5.26	2.630	1.3150	0.526	128	63.9	42.6	21.3	10.6	4.26
5.27	2.635	1.3175	0.527	127	63.6	42.4	21.2	10.6	4.24
5.28	2.640	1.3200	0.528	127	63.3	42.2	21.1	10.6	4.22
5.29	2.645	1.3225	0.529	126	63.1	42.1	21.0	10.5	4.21
5.30	2.650	1.3250	0.530	126	62.8	41.9	20.9	10.5	4.19
5.31	2.655	1.3275	0.531	125	62.6	41.7	20.9	10.4	4.17
5.32	2.660	1.3300	0.532	125	62.3	41.5	20.8	10.4	4.15
5.33	2.665	1.3325	0.533	124	62.1	41.4	20.7	10.3	4.14
5.34	2.670	1.3350	0.534	124	61.8	41.2	20.6	10.3	4.12
5.35	2.675	1.3375	0.535	123	61.5	41.0	20.5	10.3	4.10
5.36	2.680	1.3400	0.536	123	61.3	40.9	20.4	10.2	4.09
5.37	2.685	1.3425	0.537	122	61.0	40.7	20.3	10.2	4.07
5.38	2.690	1.3450	0.538	122	60.8	40.5	20.3	10.1	4.05
5.39	2.695	1.3475	0.539	121	60.6	40.4	20.2	10.1	4.04
5.40	2.700	1.3500	0.540	121	60.3	40.2	20.1	10.1	4.02
5.41	2.705	1.3525	0.541	120	60.1	40.0	20.0	10.0	4.00
5.42	2.710	1.3550	0.542	120	59.8	39.9	19.9	9.97	3.99

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
5.43	2.715	1.3575	0.543	119	59.6	39.7	19.9	9.93	3.97
5.44	2.720	1.3600	0.544	119	59.3	39.6	19.8	9.89	3.96
5.45	2.725	1.3625	0.545	118	59.1	39.4	19.7	9.85	3.94
5.46	2.730	1.3650	0.546	118	58.9	39.2	19.6	9.81	3.92
5.47	2.735	1.3675	0.547	117	58.6	39.1	19.5	9.77	3.91
5.48	2.740	1.3700	0.548	117	58.4	38.9	19.5	9.73	3.89
5.49	2.745	1.3725	0.549	116	58.2	38.8	19.4	9.69	3.88
5.50	2.750	1.3750	0.550	116	57.9	38.6	19.3	9.66	3.86
5.51	2.755	1.3775	0.551	115	57.7	38.5	19.2	9.62	3.85
5.52	2.760	1.3800	0.552	115	57.5	38.3	19.2	9.58	3.83
5.53	2.765	1.3825	0.553	114	57.2	38.2	19.1	9.54	3.82
5.54	2.770	1.3850	0.554	114	57.0	38.0	19.0	9.50	3.80
5.55	2.775	1.3875	0.555	114	56.8	37.9	18.9	9.47	3.79
5.56	2.780	1.3900	0.556	113	56.6	37.7	18.9	9.43	3.77
5.57	2.785	1.3925	0.557	113	56.3	37.6	18.8	9.39	3.76
5.58	2.790	1.3950	0.558	112	56.1	37.4	18.7	9.35	3.74
5.59	2.795	1.3975	0.559	112	55.9	37.3	18.6	9.32	3.73
5.60	2.800	1.4000	0.560	111	55.7	37.1	18.6	9.28	3.71
5.61	2.805	1.4025	0.561	111	55.5	37.0	18.5	9.24	3.70
5.62	2.810	1.4050	0.562	110	55.2	36.8	18.4	9.21	3.68
5.63	2.815	1.4075	0.563	110	55.0	36.7	18.3	9.17	3.67
5.64	2.820	1.4100	0.564	110	54.8	36.5	18.3	9.14	3.65
5.65	2.825	1.4125	0.565	109	54.6	36.4	18.2	9.10	3.64
5.66	2.830	1.4150	0.566	109	54.4	36.3	18.1	9.06	3.63
5.67	2.835	1.4175	0.567	108	54.2	36.1	18.1	9.03	3.61

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
5.68	2.840	1.4200	0.568	108	54.0	36.0	18.0	8.99	3.60
5.69	2.845	1.4225	0.569	107	53.7	35.8	17.9	8.96	3.58
5.70	2.850	1.4250	0.570	107	53.5	35.7	17.8	8.92	3.57
5.71	2.855	1.4275	0.571	107	53.3	35.6	17.8	8.89	3.56
5.72	2.860	1.4300	0.572	106	53.1	35.4	17.7	8.85	3.54
5.73	2.865	1.4325	0.573	106	52.9	35.3	17.6	8.82	3.53
5.74	2.870	1.4350	0.574	105	52.7	35.1	17.6	8.79	3.51
5.75	2.875	1.4375	0.575	105	52.5	35.0	17.5	8.75	3.50
5.76	2.880	1.4400	0.576	105	52.3	34.9	17.4	8.72	3.49
5.77	2.885	1.4425	0.577	104	52.1	34.7	17.4	8.68	3.47
5.78	2.890	1.4450	0.578	104	51.9	34.6	17.3	8.65	3.46
5.79	2.895	1.4475	0.579	103	51.7	34.5	17.2	8.62	3.45
5.80	2.900	1.4500	0.580	103	51.5	34.3	17.2	8.59	3.43
5.81	2.905	1.4525	0.581	103	51.3	34.2	17.1	8.55	3.42
5.82	2.910	1.4550	0.582	102	51.1	34.1	17.0	8.52	3.41
5.83	2.915	1.4575	0.583	102	50.9	33.9	17.0	8.49	3.39
5.84	2.920	1.4600	0.584	101	50.7	33.8	16.9	8.45	3.38
5.85	2.925	1.4625	0.585	101	50.5	33.7	16.8	8.42	3.37
5.86	2.930	1.4650	0.586	101	50.3	33.6	16.8	8.39	3.36
5.87	2.935	1.4675	0.587	100	50.2	33.4	16.7	8.36	3.34
5.88	2.940	1.4700	0.588	99.9	50.0	33.3	16.7	8.33	3.33
5.89	2.945	1.4725	0.589	99.5	49.8	33.2	16.6	8.30	3.32
5.90	2.950	1.4750	0.590	99.2	49.6	33.1	16.5	8.26	3.31
5.91	2.955	1.4775	0.591	98.8	49.4	32.9	16.5	8.23	3.29
5.92	2.960	1.4800	0.592	98.4	49.2	32.8	16.4	8.20	3.28

(续)

球直径 $D/\text{mm}$				试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$					
				30	15	10	5	2.5	1
				试验力 $F/\text{N}$					
10				29420	14710	9807	4903	2452	980.7
	5			7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		2.5		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
			1	294.2	—	98.07	49.03	24.52	9.807
压痕平均直径 $d/\text{mm}$				布氏硬度 HBW					
5.93	2.965	1.4825	0.593	98.0	49.0	32.7	16.3	8.17	3.27
5.94	2.970	1.4850	0.594	97.7	48.8	32.6	16.3	8.14	3.26
5.95	2.975	1.4875	0.595	97.3	48.7	32.4	16.2	8.11	3.24
5.96	2.980	1.4900	0.596	96.9	48.5	32.3	16.2	8.08	3.23
5.97	2.985	1.4925	0.597	96.6	48.3	32.2	16.1	8.05	3.22
5.98	2.990	1.4950	0.598	96.2	48.1	32.1	16.0	8.02	3.21
5.99	2.995	1.4975	0.599	95.9	47.9	32.0	16.0	7.99	3.20
6.00	3.000	1.5000	0.600	95.5	47.7	31.8	15.9	7.96	3.18

3.5.3 维氏硬度的测定

1. 试验原理

1) 将顶部两相对面具有规定角度 ( $136^\circ$ ) 的正四棱锥体金刚石压头以选定的试验力  $F$  压入试样表面, 经保持规定时间后, 卸除试验力, 测量试样表面压痕对角线长度, 如图 3-10 所示。维氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商, 压痕被视为具有正方形基面并与压头角度相同的理想形状。

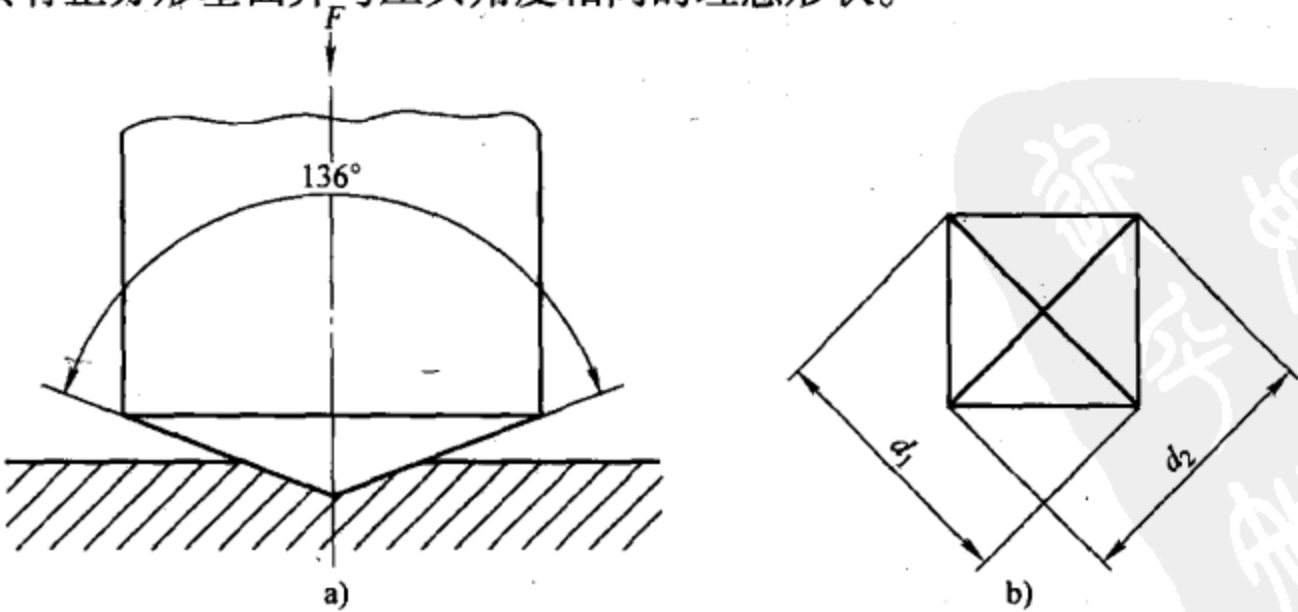


图 3-10 维氏硬度试验原理

a) 压头 (金刚石锥体) b) 维氏硬度压痕

2) 维氏硬度的计算如下:

维氏硬度 =  $0.102 \times \frac{F}{A} = 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx \frac{0.1891F}{d^2}$

即维氏硬度的计算公式为

维氏硬度 =  $\frac{0.1891F}{d^2}$  (3-3)

式中 0.102——试验力单位由 kgf 更换为 N 后需要乘以的系数, 即  $1/g = 1/9.80665 = 0.102$  ( $g$  为标准重力加速度);

$F$ ——试验力, 单位为 N;

$A$ ——压痕表面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;

$d$ ——压痕平均对角线长度, 单位为 mm,  $d = (d_1 + d_2)/2$ ,  $d_1$ 、 $d_2$  为测量的两对角线长度 (见图 3-10)。

2. 硬度值的表示

维氏硬度用 HV 表示, 符号之前为硬度值, 符号之后依次为选择的试验力值 (见表 3-17)、试验力保持时间 (10 ~ 15s 不标注)。如 640HV30 表示在试验力为 294.2N 下保持 10 ~ 15s 测定的维氏硬度值为 640, 640HV30/20 表示在试验力为 294.2N 下保持 20s 测定的维氏硬度值为 640。

表 3-17 试验力的选择

维氏硬度试验		小载荷维氏硬度试验		显微维氏硬度试验	
硬度符号	试验力/N	硬度符号	试验力/N	硬度符号	试验力/N
HV5	49.03	HV0.2	1.961	HV0.01	0.09807
HV10	98.07	HV0.3	2.942	HV0.015	0.1471
HV20	196.1	HV0.5	4.903	HV0.02	0.1961
HV30	294.2	HV1	9.807	HV0.025	0.2452
HV50	490.3	HV2	19.61	HV0.05	0.4903
HV100	980.7	HV3	29.42	HV0.1	0.9807

3. 试验程序

1) 使压头与试样表面接触, 垂直于试验面施加试验力, 加力过程中不应有冲击和振动, 直至将试验力施加至规定值。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应在 2 ~ 10s 之间。对于小载荷维氏硬度试验和显微维氏硬度试验, 压头下降速度应不大于 0.2mm/s。

2) 试验力保持时间为 10 ~ 15s, 对于特殊材料, 试验力保持时间可以延长,



但误差应在  $\pm 2s$  之内。

3) 任一压痕中心距试样边缘距离, 对于钢、铜及铜合金, 至少应为压痕对角线长度的 2.5 倍; 对于轻金属、铅、锡及合金, 至少应为压痕对角线长度的 3 倍。两相邻压痕中心之间距离, 对于钢、铜及铜合金, 至少应为压痕对角线长度的 3 倍; 对于轻金属、铅、锡及合金, 至少应为压痕对角线长度的 6 倍。如果相邻两压痕大小不同, 应以较大压痕确定压痕间距。

4) 测量压痕两条对角线的长度, 用式 (3-3) 计算硬度值。也可用其算术平均值按表 3-18 查出维氏硬度值。

5) 在平面上压痕两对角线长度之差应不超过对角线平均值的 5%, 如果超过 5%, 必须在试验报告中注明。

表 3-18 压痕对角线长度与维氏硬度值 (HV10) 对照表

压痕对角线长度/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.10	1855	1818	1782	1748	1715	1682	1651	1620	1590	1561
0.11	1533	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1355	1332	1310
0.12	1288	1267	1246	1226	1206	1187	1168	1150	1132	1114
0.13	1097	1081	1064	1048	1033	1018	1003	988	974	960
0.14	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0.15	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0.16	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
0.17	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0.18	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0.19	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0.20	464	459	454	450	446	441	437	433	429	425
0.21	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0.22	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354
0.23	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0.24	322	319	317	314	311	309	306	304	302	299
0.25	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0.26	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0.27	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0.28	237	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0.29	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0.30	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0.31	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182

(续)

压痕对角线长度/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.32	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0.33	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0.34	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152
0.35	151	151	150	149	148	147	146	146	145	144
0.36	143	142	142	141	140	139	138	138	137	136
0.37	135	135	134	133	133	132	131	130	130	129
0.38	128	128	127	126	126	125	124	124	123	123
0.39	122	121	121	120	119	119	118	118	117	116
0.40	116	115	115	114	114	113	113	112	111	110
0.41	110	110	109	109	108	108	107	107	106	106
0.42	105	105	104	104	103	103	102	102	101	101
0.43	100	99.8	99.4	98.9	98.5	98.0	97.6	97.1	96.7	96.2
0.44	95.8	95.4	94.9	94.5	94.1	93.6	93.2	92.8	92.4	92.0
0.45	91.6	91.2	90.8	90.4	90.0	89.6	89.2	88.8	88.4	88.0
0.46	87.6	87.3	86.9	86.5	86.1	85.8	85.4	85.0	84.7	84.3
0.47	84.0	83.6	83.2	82.9	82.5	82.2	81.8	81.5	81.2	80.8
0.48	80.5	80.2	79.8	79.5	79.2	78.8	78.5	78.2	77.9	77.6
0.49	77.2	76.9	76.6	76.3	76.0	75.7	75.4	75.1	74.8	74.5
0.50	74.2	73.9	73.6	73.3	73.0	72.7	72.4	72.1	71.9	71.6
0.51	71.3	71.0	70.7	70.5	70.2	69.9	69.7	69.4	69.1	68.8
0.52	68.6	68.3	68.1	67.8	67.5	67.3	67.0	66.8	66.5	66.3
0.53	66.0	65.8	65.5	65.3	65.0	64.8	64.6	64.3	64.1	63.8
0.54	63.6	63.4	63.1	62.9	62.7	62.4	62.2	62.0	61.8	61.5
0.55	61.3	61.1	60.9	60.6	60.4	60.2	60.0	59.8	59.6	59.3
0.56	59.1	58.9	58.7	58.5	58.3	58.1	57.9	57.7	57.5	57.3
0.57	57.1	56.9	56.7	56.5	56.3	56.1	55.9	55.7	55.5	55.3
0.58	55.1	54.9	54.7	54.6	54.4	54.2	54.0	53.8	53.6	53.5
0.59	53.3	53.1	52.9	52.7	52.6	52.4	52.2	52.0	51.9	51.7
0.60	51.5	51.3	51.2	51.0	50.8	50.7	50.5	50.3	50.2	50.0
0.61	49.8	49.7	49.5	49.4	49.2	49.0	48.9	48.7	48.6	48.4
0.62	48.2	48.1	47.9	47.8	47.6	47.5	47.3	47.2	47.0	46.9
0.63	46.7	46.6	46.4	46.3	46.1	46.0	45.8	45.7	45.6	45.4

(续)

压痕对角线长度/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.64	45.3	45.1	45.0	44.9	44.7	44.6	44.4	44.3	44.2	44.0
0.65	43.9	43.8	43.6	43.5	43.4	43.2	43.1	43.0	42.8	42.7
0.66	42.6	42.4	42.3	42.2	42.1	41.9	41.8	41.7	41.6	41.4
0.67	41.3	41.2	41.1	40.9	40.8	40.7	40.6	40.5	40.3	40.2
0.68	40.1	40.0	39.9	39.8	39.6	39.5	39.4	39.3	39.2	39.1
0.69	39.0	38.8	38.7	38.6	38.5	38.4	38.3	38.2	38.1	38.0
0.70	37.8	37.7	37.6	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.0	36.9
0.71	36.8	36.7	36.6	36.5	36.4	36.3	36.2	36.1	36.0	35.9
0.72	35.8	35.7	35.6	35.5	35.4	35.3	35.2	35.1	35.0	34.9
0.73	34.8	34.7	34.6	34.5	34.4	34.3	34.2	34.1	34.0	34.0
0.74	33.9	33.8	33.7	33.6	33.5	33.4	33.3	33.2	33.1	33.1
0.75	33.0	32.9	32.8	32.7	32.6	32.5	32.4	32.4	32.3	32.2
0.76	32.1	32.0	31.9	31.9	31.8	31.7	31.6	31.5	31.4	31.4
0.77	31.3	31.2	31.1	31.0	31.0	30.9	30.8	30.7	30.6	30.6
0.78	30.5	30.4	30.3	30.2	30.2	30.1	30.0	29.9	29.9	29.8
0.79	29.7	29.6	29.6	29.5	29.4	29.3	29.3	29.2	29.1	29.0
0.80	29.0	28.9	28.8	28.8	28.7	28.6	28.5	28.5	28.4	28.3
0.81	28.3	28.2	28.1	28.0	28.1	27.9	27.9	27.8	27.7	27.6
0.82	27.6	27.5	27.4	27.4	27.3	27.2	27.2	27.1	27.0	27.0
0.83	26.9	26.9	26.8	26.7	26.7	26.6	26.5	26.5	26.4	26.3
0.84	26.3	26.2	26.2	26.1	26.0	26.0	25.9	25.8	25.9	25.7
0.85	25.7	25.6	25.6	25.5	25.4	25.4	25.3	25.3	25.2	25.1
0.86	25.1	25.0	25.0	24.9	24.8	24.8	24.7	24.7	24.6	24.6
0.87	24.5	24.4	24.4	24.3	24.3	24.2	24.2	24.1	24.1	24.0
0.88	23.9	23.9	23.8	23.8	23.7	23.7	23.6	23.6	23.5	23.5
0.89	23.4	23.4	23.3	23.2	23.2	23.2	23.1	23.0	23.0	22.9
0.90	22.9	22.8	22.8	22.7	22.7	22.6	22.6	22.5	22.5	22.4
0.91	22.4	22.3	22.3	22.3	22.2	22.2	22.1	22.1	22.0	22.0
0.92	21.9	21.9	21.8	21.8	21.7	21.7	21.6	21.6	21.5	21.5
0.93	21.4	21.4	21.3	21.3	21.3	21.2	21.2	21.1	21.1	21.0
0.94	21.0	20.9	20.9	20.9	20.8	20.8	20.7	20.7	20.6	20.6
0.95	20.5	20.5	20.5	20.4	20.4	20.3	20.3	20.2	20.2	20.2



(续)

压痕对角线长度/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.28	11.3	11.3	11.3	11.3	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
1.29	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.0	11.0	11.0	11.0
1.30	11.0	11.0	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.8	10.8
1.31	10.8	10.8	10.8	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7
1.32	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.5	10.5	10.5	10.5
1.33	10.5	10.6	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3
1.34	10.3	10.5	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2
1.35	10.2	10.3	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.0
1.36	10.0	10.2	10.0	9.98	9.97	9.95	9.94	9.92	9.91	9.90
1.37	9.88	9.87	9.85	9.84	9.82	9.81	9.79	9.78	9.77	9.75
1.38	9.74	9.72	9.71	9.70	9.68	9.67	9.65	9.64	9.63	9.61
1.39	9.60	9.58	9.57	9.56	9.54	9.53	9.52	9.50	9.49	9.48
1.40	9.46	9.45	9.43	9.42	9.41	9.39	9.38	9.37	9.35	9.34
1.41	9.33	9.31	9.30	9.29	9.28	9.26	9.25	9.24	9.22	9.21
1.42	9.20	9.18	9.17	9.16	9.15	9.13	9.12	9.11	9.09	9.08
1.43	9.07	9.06	9.04	9.03	9.02	9.01	8.99	8.98	8.97	8.96
1.44	8.94	8.93	8.92	8.91	8.89	8.88	8.87	8.86	8.84	8.83
1.45	8.82	8.81	8.80	8.78	8.77	8.76	8.75	8.74	8.72	8.71
1.46	8.70	8.69	8.68	8.66	8.65	8.64	8.63	8.62	8.61	8.59
1.47	8.58	8.57	8.56	8.55	8.54	8.52	8.51	8.50	8.49	8.48
1.48	8.47	8.46	8.44	8.43	8.42	8.41	8.40	8.39	8.38	8.36
1.49	8.35	8.34	8.33	8.32	8.31	8.30	8.29	8.28	8.26	8.25
1.50	8.24	8.23	8.22	8.21	8.20	8.19	8.18	8.17	8.16	8.14
1.51	8.13	8.12	8.11	8.10	8.09	8.08	8.07	8.06	8.05	8.04
1.52	8.03	8.02	8.01	8.00	7.98	7.97	7.96	7.95	7.94	7.93
1.53	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88	7.87	7.86	7.85	7.84	7.83
1.54	7.82	7.81	7.80	7.79	7.78	7.77	7.76	7.75	7.74	7.73
1.55	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.67	7.66	7.65	7.64	7.63
1.56	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.56	7.55	7.54	7.53
1.57	7.52	7.51	7.50	7.49	7.49	7.48	7.47	7.46	7.45	7.44
1.58	7.43	7.41	7.41	7.40	7.39	7.38	7.37	7.36	7.35	7.34
1.59	7.34	7.32	7.32	7.31	7.30	7.29	7.28	7.27	7.26	7.25

(续)

压痕对角线长度/mm	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.60	7.24	7.23	7.23	7.22	7.21	7.20	7.19	7.18	7.17	7.16
1.61	7.15	7.14	7.14	7.13	7.12	7.11	7.10	7.09	7.08	7.08
1.62	7.07	7.05	7.05	7.04	7.03	7.02	7.01	7.01	7.00	6.99
1.63	6.98	6.96	6.96	6.95	6.95	6.94	6.93	6.92	6.91	6.90
1.64	6.90	6.88	6.88	6.87	6.86	6.85	6.84	6.84	6.83	6.82
1.65	6.81	6.80	6.80	6.79	6.78	6.77	6.76	6.75	6.75	6.74
1.66	6.73	6.71	6.71	6.71	6.70	6.69	6.68	6.67	6.67	6.66
1.67	6.65	6.63	6.63	6.63	6.62	6.61	6.60	6.59	6.59	6.58
1.68	6.57	6.56	6.56	6.55	6.54	6.53	6.52	6.52	6.51	6.50
1.69	6.49	6.48	6.48	6.47	6.46	6.55	6.45	6.44	6.43	6.42
1.70	6.42	6.40	6.40	6.39	6.39	6.38	6.37	6.36	6.36	6.35
1.71	6.34	6.33	6.33	6.32	6.31	6.31	6.30	6.29	6.28	6.28
1.72	6.27	6.25	6.25	6.25	6.24	6.23	6.23	6.22	6.21	6.20
1.73	6.20	6.18	6.18	6.17	6.17	6.16	6.15	6.15	6.14	6.13
1.74	6.13	6.11	6.11	6.10	6.10	6.09	6.08	6.08	6.07	6.06
1.75	6.06	6.04	6.04	6.03	6.03	6.02	6.01	6.01	6.00	5.99
1.76	5.99	5.97	5.97	5.97	5.96	5.95	5.95	5.94	5.93	5.93
1.77	5.92	5.91	5.91	5.90	5.89	5.89	5.88	5.87	5.87	5.86
1.78	5.85	5.84	5.84	5.83	5.83	5.82	5.81	5.81	5.80	5.79
1.79	5.79	5.77	5.77	5.77	5.76	5.76	5.75	5.74	5.74	5.73
1.80	5.72	5.71	5.71	5.70	5.70	5.69	5.69	5.68	5.67	5.67
1.81	5.66	5.65	5.65	5.64	5.64	5.63	5.62	5.62	5.61	5.60
1.82	5.60	5.59	5.59	5.58	5.57	5.57	5.56	5.56	5.55	5.54
1.83	5.54	5.53	5.53	5.52	5.51	5.51	5.50	5.50	5.49	5.48
1.84	5.48	5.47	5.47	5.46	5.45	5.45	5.44	5.44	5.43	5.42
1.85	5.42	5.41	5.41	5.40	5.40	5.39	5.38	5.38	5.37	5.37
1.86	5.36	5.35	5.35	5.34	5.34	5.33	5.33	5.32	5.31	5.31
1.87	5.30	5.29	5.29	5.29	5.28	5.28	5.27	5.26	5.26	5.25
1.88	5.25	5.24	5.24	5.23	5.22	5.22	5.21	5.21	5.20	5.20
1.89	5.19	5.18	5.18	5.18	5.17	5.16	5.16	5.15	5.15	5.14
1.90	5.14	5.13	5.13	5.12	5.12	5.11	5.10	5.10	5.09	5.09
1.91	5.08	5.08	5.07	5.07	5.06	5.06	5.05	5.05	5.04	5.04
1.92	5.03	5.03	5.02	5.01	5.01	5.00	5.00	4.99	4.99	4.98

注：本表中的维氏硬度值是按试验力 98.07N 计算得到的 HV10。若使用其他试验力，即选其他维氏硬度符号时，则表中硬度值应分别乘以 3-19 所列系数。



表 3-19 维氏硬度换算系数

维氏硬度符号	HV0.001	HV0.002	HV0.005	HV0.01	HV0.02	HV0.025	HV0.05
试验力/N	0.009807	0.01961	0.04903	0.09807	0.19612	0.2452	0.4903
系数	0.0001	0.0002	0.0005	0.001	0.002	0.0025	0.005
维氏硬度符号	HV0.1	HV0.2	HV0.3	HV0.5	HV1	HV2	HV2.5
试验力/N	0.9807	1.961	2.942	4.903	9.807	19.61	24.52
系数	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.25
维氏硬度符号	HV3	HV5	HV10	HV20	HV30	HV50	HV100
试验力/N	29.54	49.03	98.07	196.1	294.2	490.3	980.7
系数	0.3	0.5	1	2	3	5	10

### 3.5.4 努氏硬度的测定

#### 1. 试验原理

1) 将顶部两相对面具有规定角度的菱形棱锥体金刚石压头用试验力  $F$  压入试样表面, 经规定保持时间后卸除试验力, 测量试样表面压痕长对角线的长度, 如图 3-11 和图 3-12 所示。努氏硬度与试验力除以压痕投影面积所得的商成正比, 压痕被视为具有与压头顶部角度相同的菱形基面棱锥体形状。

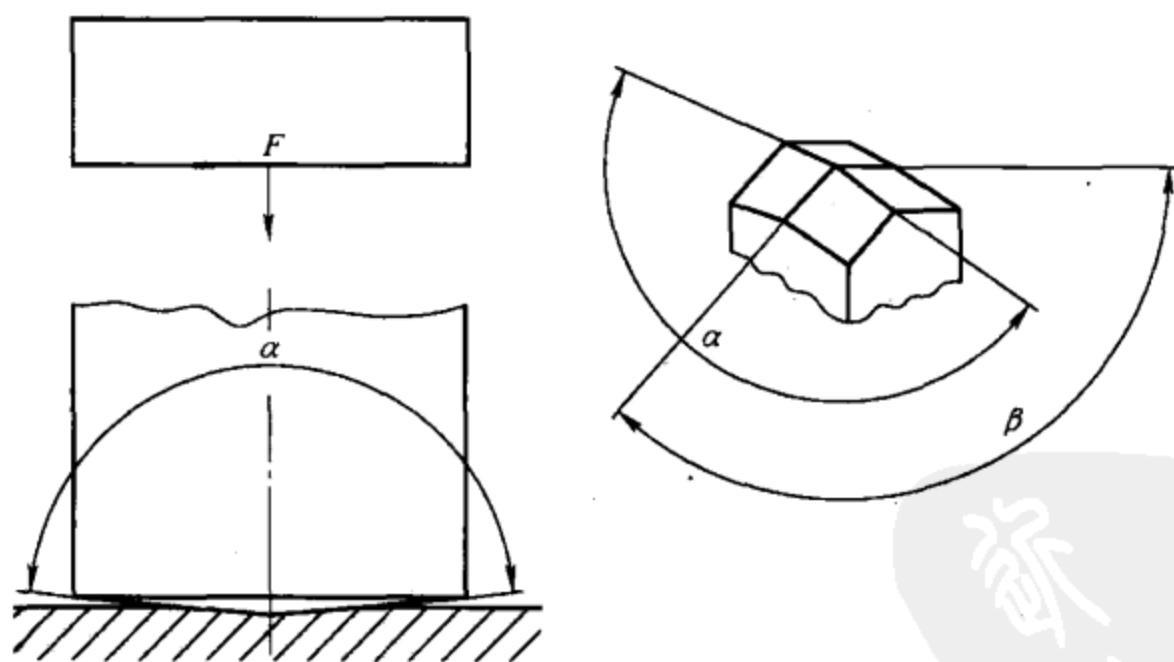


图 3-11 努氏硬度压头

2) 努氏硬度的计算如下:

$$\text{努氏硬度} = 0.102 \times \frac{F}{A} = 0.102 \times \frac{F}{d^2 c} \approx 0.102 \times \frac{F}{0.07028 d^2} \approx \frac{1.451 F}{d^2}$$

即努氏硬度的计算公式为

努氏硬度 =  $\frac{1.451F}{d^2}$

(3-4)

式中 0.102——试验力单位由 kgf 更换为 N 后需要乘以的系数，即  $1/g = 1/9.80665 = 0.102$  ( $g$  标准重力加速度)；

$F$ ——试验力，单位为 N；

$A$ ——压痕投影面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$d$ ——压痕长对角线长度，单位为 mm；

$c$ ——压头常数， $c = \tan(\beta/2)/[2\tan(\alpha/2)]$ ，其中， $\alpha$ 、 $\beta$  是相对棱边之间的夹角，分别为  $172.5^\circ \pm 0.1^\circ$ 、 $130^\circ \pm 0.1^\circ$ 。

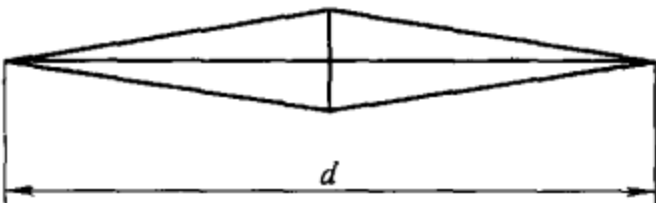


图 3-12 努氏硬度压痕

2. 硬度值的表示

努氏硬度用 HK 表示，符号之前为硬度值，符号之后依次为表示试验力的数字（见表 3-20 所示）、试验力保持时间（10 ~ 15s 不标注）。如 640HK0.1 表示在试验力为 0.9807N 下保持 10 ~ 15s 测定的努氏硬度值为 640；640HK0.1/20 表示在试验力为 0.9807N 下保持 20s 测定的努氏硬度值为 640。

表 3-20 试验力的选择

硬度符号	试验力 $F/\text{N}$	硬度符号	试验力 $F/\text{N}$
HK0.01	0.09807	HK0.2	1.961
HK0.02	0.1961	HK0.3	2.942
HK0.025	0.2452	HK0.5	4.903
HK0.05	0.4903	HK1	9.807
HK0.1	0.9807		

3. 试验程序

1) 使压头与试样表面接触，垂直于试验面施加试验力，加力过程中不应有冲击和振动，直至将试验力施加至规定值。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应不超过 10s，压头下降速度应在  $15 \sim 70\mu\text{m/s}$  之间。

2) 试验力保持时间为 10 ~ 15s。对于特殊材料，试验力保持时间可以延长，但误差应在  $\pm 2\text{s}$  之内。

3) 任一压痕边界距试样边缘的距离，对于钢、铜及铜合金，至少应为压痕短对角线长度的 2.5 倍；对于轻金属、铅、锡及合金，至少应为压痕短对角线长度的 3 倍。两相邻压痕之间的距离，对于钢、铜及铜合金，至少应为压痕短对角线长度的 3 倍；对于轻金属、铅、锡及合金，至少应为压痕短对角线长度的 6 倍。如果相

邻两压痕大小不同, 应以较大压痕确定压痕间距。

4) 测量压痕长对角线的长度, 按式 (3-4) 计算努氏硬度。

#### 4. 平面努氏硬度值的计算

平面努氏硬度值的计算如表 3-21 所示。

表 3-21 平面努氏硬度值的计算表

压痕对角线 $d/\text{mm}$	试验力/ $\text{N}$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0200	355.8	711.3	889.5	1779	—	—	—	—	—
0.0202	348.7	697.2	872.0	1743	—	—	—	—	—
0.0204	341.9	683.6	855.0	1709	—	—	—	—	—
0.0206	335.3	670.4	838.4	1676	—	—	—	—	—
0.0208	328.9	657.6	822.4	1644	—	—	—	—	—
0.0210	322.7	645.1	806.8	1613	—	—	—	—	—
0.0212	316.6	633.0	791.7	1583	—	—	—	—	—
0.0214	310.7	621.2	776.9	1553	—	—	—	—	—
0.0216	305.0	609.8	762.6	1525	—	—	—	—	—
0.0218	299.4	598.6	748.7	1497	2994	—	—	—	—
0.0220	294.0	587.8	735.1	1470	2940	—	—	—	—
0.0222	288.7	577.3	721.9	1443	2887	—	—	—	—
0.0224	283.6	567.0	709.1	1418	2836	—	—	—	—
0.0226	278.6	557.0	696.6	1393	2786	—	—	—	—
0.0228	273.7	547.3	684.4	1368	2737	—	—	—	—
0.0230	269.0	537.8	672.6	1345	2690	—	—	—	—
0.0232	264.4	528.6	661.0	1322	2644	—	—	—	—
0.0234	259.9	519.6	649.8	1299	2599	—	—	—	—
0.0236	255.5	510.8	638.8	1277	2555	—	—	—	—
0.0238	251.2	502.3	628.1	1256	2512	—	—	—	—
0.0240	247.0	493.9	617.7	1235	2470	—	—	—	—
0.0242	243.0	485.8	607.5	1215	2430	—	—	—	—
0.0244	239.0	477.9	597.6	1195	2390	—	—	—	—
0.0246	235.1	470.1	587.9	1176	2351	—	—	—	—
0.0248	231.4	462.6	578.5	1157	2314	—	—	—	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0250	227.7	455.2	569.3	1138	2277	—	—	—	—
0.0252	224.1	448.0	560.3	1120	2241	—	—	—	—
0.0254	220.6	441.0	551.5	1103	2206	—	—	—	—
0.0256	217.1	434.1	542.9	1086	2171	—	—	—	—
0.0258	213.8	427.4	534.5	1069	2138	—	—	—	—
0.0260	210.5	420.9	526.3	1052	2105	—	—	—	—
0.0262	207.3	414.5	518.3	1036	2073	—	—	—	—
0.0264	204.2	408.2	510.5	1021	2042	—	—	—	—
0.0266	201.1	402.1	502.9	1005	2011	—	—	—	—
0.0268	198.1	396.1	495.4	990.5	1981	—	—	—	—
0.0270	195.2	390.3	488.1	975.9	1952	—	—	—	—
0.0272	192.3	384.5	480.9	961.6	1923	—	—	—	—
0.0274	189.5	378.9	473.9	947.6	1895	—	—	—	—
0.0276	186.8	373.5	467.1	933.9	1868	—	—	—	—
0.0278	184.1	368.1	460.4	920.5	1841	—	—	—	—
0.0280	181.5	362.9	453.8	907.4	1815	—	—	—	—
0.0282	178.9	357.8	447.4	894.6	1789	—	—	—	—
0.0284	176.4	352.7	441.1	882.0	1764	—	—	—	—
0.0286	174.0	347.8	435.0	869.7	1740	—	—	—	—
0.0288	171.6	343.0	429.0	857.7	1716	—	—	—	—
0.0290	169.2	338.3	423.1	845.9	1692	—	—	—	—
0.0292	166.9	333.7	417.3	834.3	1669	—	—	—	—
0.0294	164.6	329.1	411.6	823.0	1646	—	—	—	—
0.0296	162.4	324.7	406.1	812.0	1624	—	—	—	—
0.0298	160.2	320.4	400.7	801.1	1602	—	—	—	—
0.0300	158.1	316.1	395.3	790.4	1581	—	—	—	—
0.0302	156.0	311.9	390.1	780.0	1560	—	—	—	—
0.0304	154.0	307.8	385.0	769.8	1540	—	—	—	—
0.0306	152.0	303.8	380.0	759.8	1520	—	—	—	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0308	150.0	299.9	375.1	749.9	1500	2999	—	—	—
0.0310	148.1	296.0	370.2	740.3	1481	2960	—	—	—
0.0312	146.2	292.3	365.5	730.8	1462	2923	—	—	—
0.0314	144.3	288.6	360.9	721.5	1443	2886	—	—	—
0.0316	142.5	284.9	356.3	712.4	1425	2849	—	—	—
0.0318	140.7	281.3	351.8	703.5	1407	2813	—	—	—
0.0320	139.0	277.8	347.5	694.7	1390	2778	—	—	—
0.0322	137.2	274.4	343.2	686.1	1372	2744	—	—	—
0.0324	135.6	271.0	338.9	677.7	1356	2710	—	—	—
0.0326	133.9	267.7	334.8	669.4	1339	2677	—	—	—
0.0328	132.3	264.4	330.7	661.3	1323	2644	—	—	—
0.0330	130.7	261.2	326.7	653.3	1307	2612	—	—	—
0.0332	129.1	258.1	322.8	645.4	1291	2581	—	—	—
0.0334	127.6	255.0	318.9	637.7	1276	2550	—	—	—
0.0336	126.0	252.0	315.2	630.1	1260	2520	—	—	—
0.0338	124.6	249.0	311.4	622.7	1246	2490	—	—	—
0.0340	123.1	246.1	307.8	615.4	1231	2461	—	—	—
0.0342	121.7	243.2	304.2	608.2	1217	2432	—	—	—
0.0344	120.3	240.4	300.7	601.2	1203	2404	—	—	—
0.0346	118.9	237.6	297.2	594.2	1189	2376	—	—	—
0.0348	117.5	234.9	293.8	587.4	1175	2349	—	—	—
0.0350	116.2	232.2	290.4	580.7	1162	2322	—	—	—
0.0352	114.8	229.6	287.2	574.2	1148	2296	—	—	—
0.0354	113.0	227.0	283.9	567.7	1136	2270	—	—	—
0.0356	112.3	224.5	280.7	561.3	1123	2245	—	—	—
0.0358	111.0	222.0	277.6	555.1	1110	2220	—	—	—
0.0360	109.8	219.5	274.5	548.9	1098	2195	—	—	—
0.0362	108.6	217.1	271.5	542.9	1086	2171	—	—	—
0.0364	107.4	214.7	268.5	536.9	1074	2147	—	—	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0366	106.2	212.4	265.6	531.1	1062	2124	—	—	—
0.0368	105.1	210.1	262.7	525.3	1051	2101	—	—	—
0.0370	103.9	207.8	259.9	519.6	1039	2078	—	—	—
0.0372	102.8	205.6	257.1	514.1	1028	2056	—	—	—
0.0374	101.7	203.4	254.4	508.6	1017	2034	—	—	—
0.0376	100.7	201.2	251.7	503.2	1007	2012	—	—	—
0.0378	99.59	199.1	249.0	497.9	995.9	1991	2988	—	—
0.0380	98.55	197.0	246.4	492.7	985.5	1970	2956	—	—
0.0382	97.52	195.0	243.8	487.5	975.2	1950	2925	—	—
0.0384	96.50	192.9	241.3	482.4	965.0	1929	2895	—	—
0.0386	95.51	190.9	238.8	477.5	955.1	1909	2865	—	—
0.0388	94.52	189.0	236.3	472.6	945.2	1890	2836	—	—
0.0390	93.56	187.0	233.9	467.7	935.6	1870	2807	—	—
0.0392	92.60	185.1	231.5	463.0	926.0	1851	2778	—	—
0.0394	91.67	183.3	229.2	458.3	916.7	1833	2750	—	—
0.0396	90.74	181.4	226.9	453.7	907.4	1814	2722	—	—
0.0398	89.83	179.6	224.6	449.1	898.3	1796	2695	—	—
0.0400	88.94	177.8	222.4	444.6	889.4	1778	2668	—	—
0.0402	88.05	176.0	220.2	440.2	880.5	1760	2642	—	—
0.0404	87.19	174.3	218.0	435.9	871.9	1743	2616	—	—
0.0406	86.33	172.6	215.9	431.6	863.3	1726	2590	—	—
0.0408	85.48	170.9	213.7	427.4	854.8	1709	2565	—	—
0.0410	84.65	169.2	211.7	423.2	846.5	1692	2540	—	—
0.0412	83.83	167.6	209.6	419.1	838.3	1676	2515	—	—
0.0414	83.02	166.0	207.6	415.1	830.2	1660	2491	—	—
0.0416	82.23	164.4	205.6	411.1	822.3	1644	2467	—	—
0.0418	81.44	162.8	203.6	407.2	814.4	1628	2443	—	—
0.0420	80.67	161.3	201.7	403.3	806.7	1613	2420	—	—
0.0422	79.91	159.8	199.8	399.5	799.1	1598	2397	—	—



(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0424	79.15	158.3	197.9	395.7	791.5	1583	2375	—	—
0.0426	78.41	156.8	196.1	392.0	784.1	1568	2352	—	—
0.0428	77.68	155.3	194.2	388.4	776.8	1553	2330	—	—
0.0430	76.96	153.9	192.4	384.7	769.6	1539	2309	—	—
0.0432	76.25	152.4	190.7	381.2	762.5	1524	2287	—	—
0.0434	75.55	151.0	188.9	377.7	755.5	1510	2266	—	—
0.0436	74.86	149.7	187.2	374.2	748.6	1497	2246	—	—
0.0438	74.17	148.3	185.5	370.8	741.7	1483	2225	—	—
0.0440	73.50	147.0	183.8	367.5	735.0	1470	2205	—	—
0.0442	72.84	145.6	182.1	364.1	728.4	1456	2185	—	—
0.0444	72.18	144.3	180.5	360.9	721.8	1143	2166	—	—
0.0446	71.54	143.0	178.9	357.6	715.4	1430	2146	—	—
0.0448	70.90	141.8	177.3	354.5	709.0	1418	2127	—	—
0.0450	70.27	140.5	175.7	351.3	702.7	1405	2108	—	—
0.0452	69.65	139.3	174.2	348.2	696.5	1393	2090	—	—
0.0454	69.04	138.0	172.6	345.1	690.4	1380	2071	—	—
0.0456	68.43	136.8	171.1	342.1	684.3	1368	2053	—	—
0.0458	67.84	135.6	169.6	339.1	678.4	1356	2035	—	—
0.0460	67.25	134.5	168.1	336.2	672.5	1345	2017	—	—
0.0462	66.67	133.3	166.7	333.3	666.7	1333	2000	—	—
0.0464	66.10	132.1	165.3	330.4	661.0	1321	1983	—	—
0.0466	65.53	131.0	163.8	327.6	655.3	1310	1966	—	—
0.0468	64.97	129.9	162.4	324.8	649.7	1299	1949	—	—
0.0470	64.42	128.8	161.1	322.0	644.2	1288	1933	—	—
0.0472	63.87	127.7	159.7	319.3	638.7	1277	1916	—	—
0.0474	63.34	126.6	158.4	316.6	633.4	1266	1900	—	—
0.0476	62.80	125.6	157.0	314.0	628.0	1256	1884	—	—
0.0478	62.28	124.5	155.7	311.4	622.8	1245	1868	—	—
0.0480	61.76	123.5	154.4	308.8	617.6	1235	1853	—	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0482	61.25	122.5	153.1	306.2	612.5	1225	1838	—	—
0.0484	60.75	121.4	151.9	303.7	607.5	1214	1822	—	—
0.0486	60.25	120.5	150.6	301.2	602.5	1205	1807	—	—
0.0488	59.75	119.5	149.4	298.7	597.5	1195	1793	2987	—
0.0490	59.27	118.5	148.2	296.3	592.7	1185	1778	2963	—
0.0492	58.79	117.5	147.0	293.9	587.9	1175	1764	2939	—
0.0494	58.31	116.6	145.8	291.5	583.1	1166	1749	2915	—
0.0496	57.84	115.6	144.6	289.2	578.4	1156	1735	2892	—
0.0498	57.38	114.7	143.5	286.9	573.8	1147	1721	2869	—
0.0500	56.92	113.8	142.3	284.6	569.2	1138	1708	2846	—
0.0502	56.47	112.9	141.2	282.3	564.7	1129	1694	2823	—
0.0504	56.02	112.0	140.1	280.1	560.2	1120	1681	2801	—
0.0506	55.58	111.1	139.0	277.9	555.8	1111	1667	2779	—
0.0508	55.14	110.2	137.9	275.7	551.4	1102	1654	2757	—
0.0510	54.71	109.4	136.8	273.5	547.1	1094	1641	2735	—
0.0512	54.28	108.5	135.7	271.4	542.8	1085	1628	2714	—
0.0514	53.86	107.7	134.7	269.3	538.6	1077	1616	2693	—
0.0516	53.44	106.9	133.6	267.2	534.4	1069	1603	2672	—
0.0518	53.03	106.0	132.6	265.1	530.3	1060	1591	2651	—
0.0520	52.63	105.2	131.6	263.1	526.3	1052	1579	2631	—
0.0522	52.22	104.4	130.6	261.1	522.2	1044	1567	2611	—
0.0524	51.83	103.6	129.6	259.1	518.3	1036	1555	2591	—
0.0526	51.43	102.8	128.6	257.1	514.3	1028	1543	2571	—
0.0528	51.04	102.1	127.6	255.2	510.4	1021	1531	2552	—
0.0530	50.66	101.3	126.7	253.3	506.6	1013	1520	2533	—
0.0532	50.28	100.5	125.7	251.4	502.8	1005	1508	2514	—
0.0534	49.90	99.77	124.8	249.5	499.0	997.7	1497	2495	—
0.0536	49.53	99.03	123.8	247.6	495.3	990.3	1486	2476	—
0.0538	49.16	98.29	122.9	245.8	491.6	982.9	1475	2458	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0540	48.80	97.57	122.0	244.0	488.0	975.7	1464	2440	—
0.0542	48.44	96.85	121.1	242.2	484.4	968.5	1453	2422	—
0.0544	48.08	96.14	120.2	240.4	480.8	961.4	1443	2404	—
0.0546	47.73	95.43	119.3	238.6	477.3	954.3	1432	2386	—
0.0548	47.39	94.74	118.5	236.9	473.9	947.4	1422	2369	—
0.0550	47.04	94.05	117.6	235.2	470.4	940.5	1411	2352	—
0.0552	46.70	93.37	116.8	233.5	467.0	933.7	1401	2335	—
0.0554	46.36	92.70	115.9	231.8	463.6	927.0	1391	2318	—
0.0556	46.03	92.03	115.1	230.1	460.3	920.3	1381	2301	—
0.0558	45.70	91.37	114.3	228.5	457.0	913.7	1371	2285	—
0.0560	45.38	90.72	113.5	226.8	453.8	907.2	1361	2268	—
0.0562	45.05	90.08	112.7	225.2	450.5	900.8	1352	2252	—
0.0564	44.73	89.44	111.9	223.6	447.3	894.4	1342	2236	—
0.0566	44.42	88.81	111.1	222.1	444.2	888.1	1333	2221	—
0.0568	44.11	88.18	110.3	220.5	441.1	881.8	1323	2205	—
0.0570	43.80	87.57	109.5	219.0	438.0	875.7	1314	2190	—
0.0572	43.49	86.95	108.7	217.4	434.9	869.5	1305	2174	—
0.0574	43.19	86.35	108.0	215.9	431.9	863.5	1296	2159	—
0.0576	42.89	85.75	107.2	214.4	428.9	857.5	1287	2144	—
0.0578	42.59	85.16	106.5	212.9	425.9	851.6	1278	2129	—
0.0580	42.30	84.57	105.8	211.5	423.0	845.7	1269	2115	—
0.0582	42.01	83.99	105.0	210.0	420.1	839.9	1260	2100	—
0.0584	41.72	83.42	104.3	208.6	417.2	834.2	1252	2086	—
0.0586	41.44	82.85	103.6	207.2	414.4	828.5	1243	2072	—
0.0588	41.16	82.29	102.9	205.8	411.6	822.9	1235	2058	—
0.0590	40.88	81.73	102.2	204.4	408.8	817.3	1226	2044	—
0.0592	40.60	81.18	101.5	203.0	406.0	811.8	1218	2030	—
0.0594	40.33	80.63	100.8	201.6	403.3	806.3	1210	2016	—
0.0596	40.06	80.09	100.2	200.3	400.6	800.9	1202	2003	—

(续)

压痕对角线 $d/\text{mm}$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0598	39.79	79.56	99.50	198.9	397.9	795.6	1194	1989	—
0.0600	39.53	79.03	98.83	197.6	395.3	790.3	1186	1976	—
0.0602	39.27	78.50	98.18	196.3	392.7	785.0	1178	1963	—
0.0604	39.01	77.98	97.53	195.0	390.1	779.8	1170	1950	—
0.0606	38.75	77.47	96.89	193.7	387.5	774.7	1162	1937	—
0.0608	38.49	76.96	96.25	192.4	384.9	769.6	1155	1924	—
0.0610	38.24	76.46	95.62	191.2	382.4	764.6	1147	1912	—
0.0612	37.99	75.96	95.00	189.9	379.9	759.6	1140	1899	—
0.0614	37.75	75.46	94.38	188.7	377.5	754.6	1132	1887	—
0.0616	37.50	74.98	93.77	187.5	375.0	749.8	1125	1875	—
0.0618	37.26	74.49	93.16	186.3	372.6	744.9	1118	1863	—
0.0620	37.02	74.01	92.56	185.1	370.2	740.1	1111	1851	—
0.0622	36.78	73.54	91.97	183.9	367.8	735.4	1103	1839	—
0.0624	36.55	73.07	91.38	182.7	365.5	730.7	1096	1827	—
0.0626	36.31	72.60	90.79	181.5	363.1	726.0	1089	1815	—
0.0628	36.08	72.14	90.22	180.4	360.8	721.4	1082	1804	—
0.0630	35.85	71.68	89.64	179.2	358.5	716.8	1076	1792	—
0.0632	35.63	71.23	89.08	178.1	356.3	712.3	1069	1781	—
0.0634	35.40	70.78	88.52	177.0	354.0	707.8	1062	1770	—
0.0636	35.18	70.33	87.96	175.9	351.8	703.3	1055	1759	—
0.0638	34.96	69.89	87.41	174.8	349.6	698.9	1049	1748	—
0.0640	34.74	69.46	86.87	173.7	347.4	694.6	1042	1737	—
0.0642	34.53	69.03	86.32	172.6	345.3	690.3	1036	1726	—
0.0644	34.31	68.60	85.79	171.5	343.1	686.0	1029	1715	—
0.0646	34.10	68.17	85.26	170.5	341.0	681.7	1023	1705	—
0.0648	33.89	67.75	84.73	169.4	338.9	677.5	1017	1694	—
0.0650	33.68	67.34	84.21	168.4	336.8	673.4	1010	1684	—
0.0652	33.47	66.92	83.70	167.3	334.7	669.2	1004	1673	—
0.0654	33.27	66.52	83.19	166.3	332.7	665.2	998.1	1663	—

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0656	33.07	66.11	82.68	165.3	330.7	661.1	992.0	1653	—
0.0658	32.87	65.71	82.18	164.3	328.7	657.1	986.0	1643	—
0.0660	32.67	65.31	81.68	163.3	326.7	653.1	980.0	1633	—
0.0662	32.47	64.92	81.19	162.3	324.7	649.2	974.1	1623	—
0.0664	32.28	64.53	80.70	161.4	322.8	645.3	968.3	1614	—
0.0666	32.08	64.14	80.22	160.4	320.8	641.4	962.4	1604	—
0.0668	31.89	63.76	79.74	159.4	318.9	637.6	956.7	1594	—
0.0670	31.70	63.38	79.26	158.5	317.0	633.8	951.0	1585	—
0.0672	31.51	63.00	78.79	157.5	315.1	630.0	945.3	1575	—
0.0674	31.32	62.63	78.32	156.6	313.2	626.3	939.7	1566	—
0.0676	31.14	62.26	77.86	155.7	311.4	622.6	934.2	1557	—
0.0678	30.96	61.89	77.40	154.8	309.6	618.9	928.7	1548	—
0.0680	30.77	61.53	76.95	153.8	307.7	615.3	923.2	1538	—
0.0682	30.59	61.17	76.50	152.9	305.9	611.7	917.8	1529	—
0.0684	30.42	60.81	76.05	152.1	304.2	608.1	912.5	1521	—
0.0686	30.24	60.46	75.61	151.2	302.4	604.6	907.1	1512	—
0.0688	30.06	60.10	75.17	150.3	300.6	601.0	901.9	1503	—
0.0690	29.89	59.76	74.73	149.4	298.9	597.6	896.7	1494	2989
0.0692	29.72	59.41	74.30	148.6	297.2	594.1	891.5	1486	2972
0.0694	29.55	59.07	73.87	147.7	295.5	590.7	886.4	1477	2955
0.0696	29.38	58.73	73.45	146.9	293.8	587.3	881.3	1469	2938
0.0698	29.21	58.39	73.03	146.0	292.1	583.9	876.2	1460	2921
0.0700	29.04	58.06	72.61	145.2	290.4	580.6	871.2	1452	2904
0.0702	28.88	57.73	72.20	144.4	288.8	577.3	866.3	1444	2888
0.0704	28.71	57.40	71.79	143.5	287.1	574.0	861.4	1435	2871
0.0706	28.55	57.08	71.38	142.7	285.5	570.8	856.5	1427	2855
0.0708	28.39	56.76	70.98	141.9	283.9	567.6	851.6	1419	2839
0.0710	28.23	56.44	70.58	141.1	282.3	564.4	846.9	1411	2823
0.0712	28.07	56.12	70.19	140.3	280.7	561.2	842.1	1403	2807

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0714	27.91	55.81	69.79	139.5	279.1	558.1	837.4	1395	2791
0.0716	27.76	55.50	69.40	138.8	277.6	555.0	832.7	1388	2776
0.0718	27.60	55.19	69.02	138.0	276.0	551.9	828.1	1380	2760
0.0720	27.45	54.88	68.63	137.2	274.5	548.8	823.5	1372	2745
0.0722	27.30	54.58	68.25	136.5	273.0	545.8	818.9	1365	2730
0.0724	27.15	54.28	67.88	135.7	271.5	542.8	814.4	1357	2715
0.0726	27.00	53.98	67.50	135.0	270.0	539.8	809.9	1350	2700
0.0728	26.85	53.68	67.13	134.2	268.5	536.8	805.5	1342	2685
0.0730	26.70	53.59	66.77	133.5	267.0	533.9	801.1	1335	2670
0.0732	26.56	53.10	66.40	132.8	265.6	531.0	796.7	1328	2656
0.0734	26.41	52.81	66.04	132.0	264.1	528.1	792.4	1320	2641
0.0736	26.27	52.52	65.68	131.3	262.7	525.2	788.1	1313	2627
0.0738	26.13	52.24	65.33	130.6	261.3	522.4	783.8	1306	2613
0.0740	25.99	51.95	64.97	129.9	259.9	519.5	779.6	1299	2599
0.0742	25.85	51.67	64.62	129.2	258.5	516.7	775.4	1292	2585
0.0744	25.71	51.40	64.28	128.5	257.1	514.0	771.2	1285	2571
0.0746	25.57	51.12	63.93	127.8	255.7	511.2	767.1	1278	2557
0.0748	25.43	50.85	63.59	127.1	254.3	508.5	763.0	1271	2543
0.0750	25.30	50.58	63.25	126.5	253.0	505.8	758.9	1265	2530
0.0752	25.16	50.31	62.92	125.8	251.6	503.1	754.9	1258	2516
0.0754	25.03	50.04	62.58	125.1	250.3	500.4	750.9	1251	2503
0.0756	24.90	49.78	62.25	124.5	249.0	497.8	746.9	1245	2490
0.0758	24.77	49.52	61.93	123.8	247.7	495.2	743.0	1238	2477
0.0760	24.64	49.26	61.60	123.2	246.4	492.6	739.1	1232	2464
0.0762	24.51	49.00	61.28	122.5	245.1	490.0	735.2	1225	2451
0.0764	24.38	48.74	60.96	121.9	243.8	487.4	731.4	1219	2438
0.0766	24.25	48.49	60.64	121.2	242.5	484.9	727.6	1212	2425
0.0768	24.13	48.23	60.32	120.6	241.3	482.3	723.8	1206	2413
0.0770	24.00	47.98	60.01	120.0	240.0	479.8	720.0	1200	2400



(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0772	23.88	47.74	59.70	119.4	238.8	477.4	716.3	1194	2388
0.0774	23.75	47.49	59.39	118.7	237.5	474.9	712.6	1187	2375
0.0776	23.63	47.25	59.09	118.1	236.3	472.5	708.9	1181	2363
0.0778	23.51	47.00	58.78	117.5	235.1	470.0	705.3	1175	2351
0.0780	23.39	46.76	58.48	116.0	233.9	467.6	701.7	1169	2339
0.0782	23.27	46.52	58.18	116.3	232.7	465.2	698.1	1163	2327
0.0784	23.15	46.29	57.89	115.7	231.5	462.9	694.5	1157	2315
0.0786	23.03	46.05	57.59	115.2	230.3	460.5	691.0	1152	2303
0.0788	22.92	45.82	57.30	114.6	229.2	458.2	687.5	1146	2292
0.0790	22.80	45.59	57.01	114.0	228.0	455.9	684.0	1140	2280
0.0792	22.69	45.36	56.72	113.4	226.9	453.6	680.6	1134	2269
0.0794	22.57	45.13	56.44	112.8	225.7	451.3	677.2	1128	2257
0.0796	22.46	44.90	56.15	112.3	224.6	449.0	673.8	1123	2246
0.0798	22.35	44.68	55.87	111.7	223.5	446.8	670.4	1117	2235
0.0800	22.23	44.45	55.59	111.2	222.3	444.5	667.0	1112	2223
0.0802	22.12	44.23	55.32	110.6	221.2	442.3	663.7	1106	2212
0.0804	22.01	44.01	55.04	110.1	220.1	440.1	660.4	1101	2201
0.0806	21.90	43.79	54.77	109.5	219.0	437.9	657.1	1095	2190
0.0808	21.80	43.58	54.50	109.0	218.0	435.8	653.9	1090	2180
0.0810	21.69	43.36	54.23	108.4	216.9	433.6	650.7	1084	2169
0.0812	21.58	43.15	53.96	107.9	215.8	431.5	647.5	1079	2158
0.0814	21.48	42.94	53.70	107.4	214.8	429.4	644.3	1074	2148
0.0816	21.37	42.73	53.43	106.8	213.7	427.3	641.1	1068	2137
0.0818	21.27	42.52	53.17	106.3	212.7	425.2	638.0	1063	2127
0.0820	21.16	42.31	52.91	105.8	211.6	423.1	634.9	1058	2116
0.0822	21.06	42.11	52.66	105.3	210.6	421.1	631.8	1053	2106
0.0824	20.96	41.90	52.40	104.8	209.6	419.0	628.7	1048	2096
0.0826	20.86	41.70	52.15	104.3	208.6	417.0	625.7	1043	2086
0.0828	20.76	41.50	51.90	103.8	207.6	415.0	622.7	1038	2076

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0830	20.66	41.30	51.65	103.3	206.6	413.0	619.7	1033	2066
0.0832	20.56	41.10	51.40	102.8	205.6	411.0	616.7	1028	2056
0.0834	20.46	40.90	51.15	102.3	204.6	409.0	613.8	1023	2046
0.0836	20.36	40.71	50.91	101.8	203.6	407.1	610.8	1018	2036
0.0838	20.26	40.51	50.67	101.3	202.6	405.1	607.9	1013	2026
0.0840	20.17	40.32	50.43	100.8	201.7	403.2	605.0	1008	2017
0.0842	20.07	40.13	50.19	100.3	200.7	401.3	602.1	1003	2007
0.0844	19.98	39.94	49.95	99.87	199.8	399.4	599.3	998.7	1998
0.0846	19.88	39.75	49.71	99.40	198.8	397.5	596.5	994.0	1988
0.0848	19.79	39.56	49.48	98.93	197.9	395.6	593.7	989.3	1979
0.0850	19.70	39.38	49.25	98.46	197.0	393.8	590.9	984.6	1970
0.0852	19.60	39.19	49.01	98.00	196.0	391.9	588.1	980.0	1960
0.0854	19.51	39.01	48.79	97.54	195.1	390.1	585.3	975.4	1951
0.0856	19.42	38.83	48.56	97.09	194.2	388.3	582.6	970.9	1942
0.0858	19.33	38.65	48.33	96.64	193.3	386.5	579.9	966.4	1933
0.0860	19.24	38.47	48.11	96.19	192.4	384.7	577.2	961.9	1924
0.0862	19.15	38.29	47.88	95.74	191.5	382.9	574.5	957.4	1915
0.0864	19.06	38.11	47.66	95.30	190.6	381.1	571.9	953.0	1906
0.0866	18.97	37.94	47.44	94.86	189.7	379.4	569.2	948.6	1897
0.0868	18.89	37.76	47.22	94.42	188.9	377.6	566.6	944.2	1889
0.0870	18.80	37.59	47.01	93.99	188.0	375.9	564.0	939.9	1880
0.0872	18.71	37.42	46.79	93.56	187.1	374.2	561.4	935.6	1871
0.0874	18.63	37.24	46.58	93.13	186.3	372.4	558.9	931.3	1863
0.0876	18.54	37.07	46.37	92.71	185.4	370.7	556.3	927.1	1854
0.0878	18.46	36.91	46.15	92.28	184.6	369.1	553.8	922.8	1846
0.0880	18.38	36.74	45.95	91.86	183.8	367.4	551.3	918.6	1838
0.0882	18.29	36.57	45.74	91.45	182.9	365.7	548.8	914.5	1829
0.0884	18.21	36.41	45.53	91.04	182.1	364.1	546.3	910.4	1821
0.0886	18.13	36.24	45.33	90.62	181.3	362.4	543.8	906.2	1813

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0888	18.05	36.08	45.12	90.22	180.5	360.8	541.4	902.2	1805
0.0890	17.96	35.92	44.92	89.81	179.6	359.2	538.9	898.1	1796
0.0892	17.88	35.76	44.72	89.41	178.8	357.6	536.5	894.1	1788
0.0894	17.80	35.60	44.52	89.01	178.0	356.0	534.1	890.1	1780
0.0896	17.73	35.44	44.32	88.61	177.3	354.4	531.8	886.1	1773
0.0898	17.65	35.28	44.12	88.22	176.5	352.8	529.4	882.2	1765
0.0900	17.57	35.12	43.93	87.83	175.7	351.2	527.0	878.3	1757
0.0902	17.49	34.97	43.73	87.44	174.9	349.7	524.7	874.4	1749
0.0904	17.41	34.81	43.54	87.05	174.1	348.1	522.4	870.5	1741
0.0906	17.34	34.66	43.35	86.67	173.4	346.6	520.1	866.7	1734
0.0908	17.26	34.51	43.16	86.29	172.6	345.1	517.8	862.9	1726
0.0910	17.18	34.36	42.97	85.91	171.8	343.6	515.5	859.1	1718
0.0912	17.11	34.21	42.78	85.53	171.1	342.1	513.3	855.3	1711
0.0914	17.03	34.06	42.59	85.16	170.3	340.6	511.0	851.6	1703
0.0916	16.96	33.91	42.40	84.79	169.6	339.1	508.8	847.9	1696
0.0918	16.89	33.76	42.22	84.42	168.9	337.6	506.6	844.2	1689
0.0920	16.81	33.61	42.04	84.05	168.1	336.1	504.4	840.5	1681
0.0922	16.74	33.47	41.85	83.69	167.4	334.7	502.2	836.9	1674
0.0924	16.67	33.32	41.67	83.32	166.7	333.2	500.0	833.2	1667
0.0926	16.60	33.18	41.49	82.96	166.0	331.8	497.9	829.6	1660
0.0928	16.52	33.04	41.32	82.61	165.2	330.4	495.7	826.1	1652
0.0930	16.45	32.89	41.14	82.25	164.5	328.9	493.6	822.5	1645
0.0932	16.38	32.75	40.96	81.90	163.8	327.5	491.5	819.0	1638
0.0934	16.31	32.61	40.79	81.55	163.1	326.1	489.4	815.5	1631
0.0936	16.24	32.47	40.61	81.20	162.4	324.7	487.3	812.0	1624
0.0938	16.17	32.34	40.44	80.86	161.7	323.4	485.2	808.6	1617
0.0940	16.10	32.20	40.27	80.51	161.0	322.0	483.1	805.1	1610
0.0942	16.04	32.06	40.10	80.17	160.4	320.6	481.1	801.7	1604
0.0944	15.97	31.93	39.93	79.83	159.7	319.3	479.1	798.3	1597

(续)

压痕对角线 $d/\text{mm}$	试验力/ $\text{N}$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.0946	15.90	31.79	39.76	79.49	159.0	317.9	477.0	794.9	1590
0.0948	15.83	31.66	39.59	79.16	158.3	316.6	475.0	791.6	1583
0.0950	15.77	31.52	39.42	78.83	157.7	315.2	473.0	788.3	1577
0.0952	15.70	31.39	39.26	78.49	157.0	313.9	471.0	784.9	1570
0.0954	15.64	31.26	39.09	78.17	156.4	312.6	469.1	781.7	1564
0.0956	15.57	31.13	38.93	77.84	155.7	311.3	467.1	778.4	1557
0.0958	15.51	31.00	38.77	77.51	155.1	310.0	465.2	775.1	1551
0.0960	15.44	30.87	38.61	77.19	154.4	308.7	463.2	771.9	1544
0.0962	15.38	30.74	38.45	76.87	153.8	307.4	461.3	768.7	1538
0.0964	15.31	30.61	38.29	76.55	153.1	306.1	459.4	765.5	1531
0.0966	15.25	30.49	38.13	76.24	152.5	304.9	457.5	762.4	1525
0.0968	15.19	30.36	37.97	75.92	151.9	303.6	455.6	759.2	1519
0.0970	15.12	30.24	37.81	75.61	151.2	302.4	453.7	756.1	1512
0.0972	15.06	30.11	37.66	75.30	150.6	301.1	451.8	753.0	1506
0.0974	15.00	29.99	37.50	74.99	150.0	299.9	450.0	749.9	1500
0.0976	14.94	29.87	37.35	74.68	149.4	298.7	448.2	746.8	1494
0.0978	14.88	29.74	37.20	74.38	148.8	297.4	446.3	743.8	1488
0.0980	14.82	29.62	37.05	74.07	148.2	296.2	444.5	740.7	1482
0.0982	14.76	29.50	36.90	73.77	147.6	295.0	442.7	737.7	1476
0.0984	14.70	29.38	36.75	73.47	147.0	293.8	440.9	734.7	1470
0.0986	14.64	29.26	36.60	73.17	146.4	292.6	439.1	731.7	1464
0.0988	14.58	29.15	36.45	72.88	145.8	291.5	437.3	728.8	1458
0.0990	14.52	29.03	36.30	72.58	145.2	290.3	435.6	725.8	1452
0.0992	14.46	28.91	36.16	72.29	144.6	289.1	433.8	722.9	1446
0.0994	14.40	28.79	36.01	72.00	144.0	287.9	432.1	720.0	1440
0.0996	14.34	28.68	35.87	71.71	143.4	286.8	430.3	717.1	1434
0.0998	14.29	28.56	35.72	71.43	142.9	285.6	428.6	714.3	1429
0.1000	14.23	28.45	35.58	71.14	142.3	284.5	426.9	711.4	1423
0.1002	14.17	28.34	35.44	70.86	141.7	283.4	425.2	708.6	1417

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1004	14.12	28.22	35.30	70.57	141.2	282.2	423.5	705.7	1412
0.1006	14.06	28.11	35.16	70.29	140.6	281.1	421.8	702.9	1406
0.1008	14.01	28.00	35.02	70.02	140.1	280.0	420.2	700.2	1401
0.1010	13.95	27.89	34.88	69.74	139.5	278.9	418.5	697.4	1395
0.1012	13.89	27.78	34.74	69.46	138.9	277.8	416.8	694.6	1389
0.1014	13.84	27.67	34.60	69.19	138.4	276.7	415.2	691.9	1384
0.1016	13.79	27.56	34.47	68.92	137.9	275.6	413.6	689.2	1379
0.1018	13.73	27.45	34.33	68.65	137.3	274.5	411.9	686.5	1373
0.1020	13.68	27.35	34.20	68.38	136.8	273.5	410.3	683.8	1368
0.1022	13.62	27.24	34.06	68.11	136.2	272.4	408.7	681.1	1362
0.1024	13.57	27.13	33.93	67.84	135.7	271.3	407.1	678.4	1357
0.1026	13.52	27.03	33.80	67.58	135.2	270.3	405.5	675.8	1352
0.1028	13.47	26.92	33.67	67.32	134.7	269.2	404.0	673.2	1347
0.1030	13.41	26.82	33.54	67.06	134.1	268.2	402.4	670.6	1341
0.1032	13.36	26.71	33.41	66.80	133.6	267.1	400.8	668.0	1336
0.1034	13.31	26.61	33.28	66.54	133.1	266.1	399.3	665.4	1331
0.1036	13.26	26.51	33.15	66.28	132.6	265.1	397.7	662.8	1326
0.1038	13.21	26.41	33.02	66.03	132.1	264.1	396.2	660.3	1321
0.1040	13.16	26.30	32.90	65.77	131.6	263.0	394.7	657.7	1316
0.1042	13.11	26.20	32.77	65.52	131.1	262.0	393.2	655.2	1311
0.1044	13.06	26.10	32.64	65.27	130.6	261.0	391.7	652.7	1306
0.1046	13.01	26.00	32.52	65.02	130.1	260.0	390.2	650.2	1301
0.1048	12.96	25.90	32.40	64.77	129.6	259.0	388.7	647.7	1296
0.1050	12.91	25.80	32.27	64.53	129.1	258.0	387.2	645.3	1291
0.1052	12.86	25.71	32.15	64.28	128.6	257.1	385.7	642.8	1286
0.1054	12.81	25.61	32.03	64.04	128.1	256.1	384.3	640.4	1281
0.1056	12.76	25.51	31.91	63.79	127.6	255.1	382.8	637.9	1276
0.1058	12.71	25.42	31.79	63.55	127.1	254.2	381.4	635.5	1271
0.1060	12.66	25.32	31.67	63.31	126.6	253.2	379.9	633.1	1266

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1062	12.62	25.23	31.55	63.08	126.2	252.3	378.5	630.8	1262
0.1064	12.57	25.13	31.43	62.84	125.7	251.3	377.1	628.4	1257
0.1066	12.52	25.04	31.31	62.60	125.2	250.4	375.7	626.0	1252
0.1068	12.48	24.94	31.19	62.37	124.8	249.4	374.3	623.7	1248
0.1070	12.43	24.85	31.08	62.14	124.3	248.5	372.9	621.4	1243
0.1072	12.38	24.76	30.96	61.90	123.8	247.6	371.5	619.0	1238
0.1074	12.34	24.66	30.85	61.67	123.4	246.6	370.1	616.7	1234
0.1076	12.29	24.57	30.73	61.45	122.9	245.7	368.7	614.5	1229
0.1078	12.25	24.48	30.62	61.22	122.5	244.8	367.4	612.2	1225
0.1080	12.20	24.39	30.50	60.99	122.0	243.9	366.0	609.9	1220
0.1082	12.15	24.30	30.39	60.77	121.5	243.0	364.6	607.7	1215
0.1084	12.11	24.21	30.28	60.54	121.1	242.1	363.3	605.4	1211
0.1086	12.07	24.12	30.17	60.32	120.7	241.2	362.0	603.2	1207
0.1088	12.02	24.03	30.06	60.10	120.2	240.3	360.6	601.0	1202
0.1090	11.98	23.95	29.95	59.88	119.8	239.5	359.3	598.8	1198
0.1092	11.93	23.86	29.84	59.66	119.3	238.6	358.0	596.6	1193
0.1094	11.89	23.77	29.73	59.44	118.9	237.7	356.7	594.4	1189
0.1096	11.85	23.68	29.62	59.22	118.5	236.8	355.4	595.2	1185
0.1098	11.80	23.60	29.51	59.01	118.0	236.0	354.1	590.1	1180
0.1100	11.76	23.51	29.40	58.79	117.6	235.1	352.8	587.9	1176
0.1102	11.72	23.43	29.30	58.58	117.2	234.3	351.5	585.8	1172
0.1104	11.68	23.34	29.19	58.37	116.8	233.4	350.3	583.7	1168
0.1106	11.63	23.26	29.09	58.16	116.3	232.6	349.0	581.6	1163
0.1108	11.59	23.17	28.98	57.95	115.9	231.7	347.7	579.5	1159
0.1110	11.55	23.09	28.88	57.74	115.5	230.9	346.5	577.4	1155
0.1112	11.51	23.01	28.77	57.53	115.1	230.1	345.2	575.3	1151
0.1114	11.47	22.93	28.67	57.32	114.7	229.3	344.0	573.2	1147
0.1116	11.43	22.84	28.57	57.12	114.3	228.4	342.8	571.2	1143
0.1118	11.38	22.76	28.47	56.92	113.8	227.6	341.5	569.2	1138



(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1120	11.34	22.68	28.36	56.71	113.4	226.8	340.3	567.1	1134
0.1122	11.30	22.60	28.26	56.51	113.0	226.0	339.1	565.1	1130
0.1124	11.26	22.52	28.16	56.31	112.6	225.2	337.9	563.1	1126
0.1126	11.22	22.44	28.06	56.11	112.2	224.4	336.7	561.1	1122
0.1128	11.18	22.36	27.96	55.91	111.8	223.6	335.5	559.1	1118
0.1130	11.14	22.28	27.86	55.71	111.4	222.8	334.3	557.1	1114
0.1132	11.10	22.20	27.77	55.52	111.0	222.0	333.1	555.2	1110
0.1134	11.07	22.12	27.67	55.32	110.7	221.2	332.0	553.2	1107
0.1136	11.03	22.05	27.57	55.13	110.3	220.5	330.8	551.3	1103
0.1138	10.99	21.97	27.47	54.93	109.9	219.7	329.6	549.3	1099
0.1140	10.95	21.89	27.38	54.74	109.5	218.9	328.5	547.4	1095
0.1142	10.91	21.81	27.28	54.55	109.1	218.1	327.3	545.5	1091
0.1144	10.87	21.74	27.19	54.36	108.7	217.4	326.2	543.6	1087
0.1146	10.84	21.66	27.09	54.17	108.4	216.6	325.1	541.7	1084
0.1148	10.80	21.59	27.00	53.98	108.0	215.9	323.9	539.8	1080
0.1150	10.76	21.51	26.90	53.79	107.6	215.1	322.8	537.9	1076
0.1152	10.72	21.44	26.81	53.61	107.2	214.4	321.7	536.1	1072
0.1154	10.69	21.36	26.72	53.42	106.9	213.6	320.6	534.2	1069
0.1156	10.65	21.29	26.63	53.24	106.5	212.9	319.5	532.4	1065
0.1158	10.61	21.22	26.53	53.05	106.1	212.2	318.4	530.5	1061
0.1160	10.58	21.14	26.44	52.87	105.8	211.4	317.3	528.7	1058
0.1162	10.54	21.07	26.35	52.69	105.4	210.7	316.2	526.9	1054
0.1164	10.50	21.00	26.26	52.51	105.0	210.0	315.1	525.1	1050
0.1166	10.47	20.93	26.17	52.33	104.7	209.3	314.0	523.5	1047
0.1168	10.43	20.85	26.08	52.15	104.3	208.5	312.9	521.3	1043
0.1170	10.40	20.78	25.99	51.97	104.0	207.8	311.9	519.7	1040
0.1172	10.36	20.71	25.90	51.79	103.6	207.1	310.8	517.9	1036
0.1174	10.32	20.64	25.81	51.62	103.2	206.4	309.7	516.2	1032
0.1176	10.29	20.57	25.73	51.44	102.9	205.7	308.7	514.4	1029

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1178	10.25	20.50	25.64	51.27	102.5	205.0	307.6	512.7	1025
0.1180	10.22	20.43	25.55	51.09	102.2	204.3	306.6	510.9	1022
0.1182	10.19	20.36	25.47	50.92	101.9	203.6	305.6	509.2	1019
0.1184	10.15	20.29	25.38	50.75	101.5	202.9	304.5	507.5	1015
0.1186	10.12	20.23	25.30	50.58	101.2	202.3	303.5	505.8	1012
0.1188	10.08	20.16	25.21	50.41	100.8	201.6	302.5	504.1	1008
0.1190	10.05	20.09	25.13	50.24	100.5	200.9	301.5	502.4	1005
0.1192	10.02	20.02	25.04	50.07	100.2	200.2	300.5	500.7	1002
0.1194	9.98	19.96	24.96	49.90	99.82	199.6	299.4	499.0	998.2
0.1196	9.95	19.89	24.87	49.73	99.48	198.9	298.4	497.3	994.8
0.1198	9.91	19.82	24.79	49.57	99.15	198.2	297.4	495.7	991.5
0.1200	9.88	19.76	24.71	49.40	98.82	197.6	296.5	494.0	988.2
0.1202	9.85	19.69	24.63	49.24	98.49	196.9	295.5	492.4	984.9
0.1204	9.82	19.63	24.54	49.08	98.16	196.3	294.5	490.8	981.6
0.1206	9.78	19.56	24.46	48.91	97.84	195.6	293.5	489.1	978.4
0.1208	9.75	19.50	24.38	48.75	97.51	195.0	292.5	487.5	975.1
0.1210	9.72	19.43	24.30	48.59	97.19	194.3	291.6	485.9	971.9
0.1212	9.69	19.37	24.22	48.43	96.87	193.7	290.6	484.3	968.7
0.1214	9.66	19.30	24.14	48.27	96.55	193.0	289.7	482.7	965.5
0.1216	9.62	19.24	24.06	48.11	96.24	192.4	288.7	481.1	962.4
0.1218	9.59	19.18	23.98	47.95	95.92	191.8	287.8	479.5	959.2
0.1220	9.56	19.11	23.90	47.80	95.61	191.1	286.8	478.0	956.1
0.1222	9.53	19.05	23.83	47.64	95.29	190.5	285.9	476.4	952.9
0.1224	9.50	18.99	23.75	47.48	94.98	189.9	284.9	474.8	949.8
0.1226	9.47	18.93	23.67	47.33	94.67	189.3	284.0	473.3	946.7
0.1228	9.44	18.87	23.59	47.18	94.36	188.7	283.1	471.8	943.6
0.1230	9.41	18.80	23.52	47.02	94.06	188.0	282.2	470.2	940.6
0.1232	9.38	18.74	23.44	46.87	93.75	187.4	281.3	468.7	937.5
0.1234	9.34	18.68	23.37	46.72	93.45	186.8	280.3	467.2	934.5

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1236	9.31	18.62	23.29	46.57	93.15	186.2	279.4	465.7	931.5
0.1238	9.28	18.56	23.21	46.42	92.85	185.6	278.5	464.2	928.5
0.1240	9.25	18.50	23.14	46.27	92.55	185.0	277.6	462.7	925.5
0.1242	9.22	18.44	23.07	46.12	92.25	184.4	276.7	461.2	922.5
0.1244	9.20	18.38	22.99	45.97	91.95	183.8	275.9	459.7	919.5
0.1246	9.17	18.33	22.92	45.82	91.66	183.3	275.0	458.2	916.6
0.1248	9.14	18.27	22.84	45.68	91.36	182.7	274.1	456.8	913.6
0.1250	9.11	18.21	22.77	45.53	91.07	182.1	273.2	455.3	910.7
0.1252	9.08	18.15	22.70	45.38	90.78	181.5	272.3	453.8	907.8
0.1254	9.05	18.09	22.63	45.24	90.49	180.9	271.5	452.4	904.9
0.1256	9.02	18.03	22.55	45.10	90.20	180.3	270.6	451.0	902.0
0.1258	8.99	17.98	22.48	44.95	89.92	179.8	269.8	449.5	899.2
0.1260	8.96	17.92	22.41	44.81	89.63	179.2	268.9	448.1	896.3
0.1262	8.93	17.86	22.34	44.67	89.35	178.6	268.0	446.7	893.5
0.1264	8.91	17.81	22.27	44.53	89.07	178.1	267.2	445.3	890.7
0.1266	8.88	17.75	22.20	44.39	88.78	177.5	266.4	443.9	887.8
0.1268	8.85	17.69	22.13	44.25	88.50	176.9	265.5	442.5	885.0
0.1270	8.82	17.64	22.06	44.11	88.23	176.4	264.7	441.1	882.3
0.1272	8.79	17.58	21.99	43.97	87.95	175.8	263.8	439.7	879.5
0.1274	8.77	17.53	21.92	43.83	87.67	175.3	263.0	438.3	876.7
0.1276	8.74	17.47	21.85	43.69	87.40	174.7	262.2	436.9	874.0
0.1278	8.71	17.42	21.78	43.56	87.13	174.2	261.4	435.6	871.3
0.1280	8.69	17.36	21.72	43.42	86.85	173.6	260.6	434.2	868.5
0.1282	8.66	17.31	21.65	43.29	86.58	173.1	259.7	432.9	865.8
0.1284	8.63	17.26	21.58	43.15	86.31	172.6	258.9	431.5	863.1
0.1286	8.60	17.20	21.51	43.02	86.04	172.0	258.1	430.2	860.4
0.1288	8.58	17.15	21.45	42.88	85.78	171.5	257.3	428.8	857.8
0.1290	8.55	17.10	21.38	42.75	85.51	171.0	256.5	427.5	855.1
0.1292	8.52	17.04	21.31	42.62	85.25	170.4	255.7	426.2	852.5

(续)

压痕对角线 $d/\text{mm}$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1294	8.50	16.99	21.25	42.49	84.98	169.9	255.0	424.9	849.8
0.1296	8.47	16.94	21.18	42.35	84.72	169.4	254.2	423.5	847.2
0.1298	8.45	16.89	21.12	42.22	84.46	168.9	253.4	422.2	844.6
0.1300	8.42	16.83	21.05	42.09	84.20	168.3	252.6	420.9	842.0
0.1302	8.39	16.78	20.99	41.97	83.94	167.8	251.8	419.7	839.4
0.1304	8.37	16.73	20.92	41.84	83.69	167.3	251.1	418.4	836.9
0.1306	8.34	16.68	20.86	41.71	83.43	166.8	250.3	417.1	834.3
0.1308	8.32	16.63	20.80	41.58	83.17	166.3	249.5	415.8	831.7
0.1310	8.29	16.58	20.73	41.45	82.92	165.8	248.8	414.5	829.2
0.1312	8.27	16.53	20.67	41.33	82.67	165.3	248.0	413.3	826.7
0.1314	8.24	16.48	20.61	41.20	82.42	164.8	247.2	412.0	824.2
0.1316	8.22	16.43	20.54	41.08	82.17	164.3	246.5	410.8	821.7
0.1318	8.19	16.38	20.48	40.95	81.92	163.8	245.8	409.5	819.2
0.1320	8.17	16.33	20.42	40.83	81.67	163.3	245.0	408.3	816.7
0.1322	8.14	16.28	20.36	40.71	81.42	162.8	244.3	407.1	814.2
0.1324	8.12	16.23	20.30	40.58	81.18	162.3	243.5	405.8	811.8
0.1326	8.09	16.18	20.24	40.46	80.93	161.8	242.8	404.6	809.3
0.1328	8.07	16.13	20.17	40.34	80.69	161.3	242.1	403.4	806.9
0.1330	8.04	16.08	20.11	40.22	80.45	160.8	241.3	402.2	804.5
0.1332	8.02	16.04	20.05	40.10	80.20	160.4	240.6	401.0	802.0
0.1334	8.00	15.99	19.99	39.98	79.96	159.9	239.9	399.8	799.6
0.1336	7.97	15.94	19.93	39.86	79.72	159.4	239.2	398.6	797.2
0.1338	7.95	15.89	19.87	39.74	79.49	158.9	238.5	397.4	794.9
0.1340	7.92	15.84	19.82	39.62	79.25	158.4	237.7	396.2	792.5
0.1342	7.90	15.80	19.76	39.50	79.01	158.0	237.0	395.0	790.1
0.1344	7.88	15.75	19.70	39.38	78.78	157.5	236.3	393.8	787.8
0.1346	7.85	15.70	19.64	39.27	78.54	157.0	235.6	392.7	785.4
0.1348	7.83	15.66	19.58	39.15	78.31	156.6	234.9	391.5	783.1
0.1350	7.81	15.61	19.52	39.03	78.08	156.1	234.2	390.3	780.8

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1352	7.78	15.56	19.46	38.92	77.85	155.6	233.5	389.2	778.5
0.1354	7.76	15.52	19.41	38.80	77.62	155.2	232.9	388.0	776.2
0.1356	7.74	15.47	19.35	38.69	77.39	154.7	232.2	386.9	773.9
0.1358	7.72	15.43	19.29	38.58	77.16	154.3	231.5	385.8	771.6
0.1360	7.69	15.38	19.24	38.46	76.94	153.8	230.8	384.6	769.4
0.1362	7.67	15.34	19.18	38.35	76.71	153.4	230.1	383.5	767.1
0.1364	7.65	15.29	19.12	38.24	76.48	152.9	229.5	382.4	764.8
0.1366	7.63	15.25	19.07	38.13	76.26	152.5	228.8	381.3	762.6
0.1368	7.60	15.20	19.01	38.01	76.04	152.0	228.1	380.1	760.4
0.1370	7.58	15.16	18.96	37.90	75.82	151.6	227.4	379.0	758.2
0.1372	7.56	15.11	18.90	37.79	75.60	151.1	226.8	377.9	756.0
0.1374	7.54	15.07	18.85	37.68	75.38	150.7	226.1	376.8	753.8
0.1376	7.52	15.03	18.79	37.57	75.16	150.3	225.5	375.7	751.6
0.1378	7.49	14.98	18.74	37.46	74.94	149.8	224.8	374.6	749.4
0.1380	7.47	14.94	18.68	37.36	74.72	149.4	224.2	373.6	747.2
0.1382	7.45	14.90	18.63	37.25	74.51	149.0	223.5	372.5	745.1
0.1384	7.43	14.85	18.58	37.14	74.29	148.5	222.9	371.4	742.9
0.1386	7.41	14.81	18.52	37.03	74.08	148.1	222.2	370.3	740.8
0.1388	7.39	14.77	18.47	36.93	73.86	147.7	221.6	369.3	738.6
0.1390	7.37	14.72	18.42	36.82	73.65	147.2	221.0	368.2	736.5
0.1392	7.34	14.68	18.36	36.71	73.44	146.8	220.3	367.1	734.4
0.1394	7.32	14.64	18.31	36.61	73.23	146.4	219.7	366.1	732.3
0.1396	7.30	14.60	18.26	36.50	73.02	146.0	219.1	365.0	730.2
0.1398	7.28	14.56	18.21	36.40	72.81	145.6	218.4	364.0	728.1
0.1400	7.26	14.52	18.15	36.30	72.60	145.2	217.8	363.0	726.0
0.1402	7.24	14.47	18.10	36.19	72.40	144.7	217.2	361.9	724.0
0.1404	7.22	14.43	18.05	36.09	72.19	144.3	216.6	360.9	721.9
0.1406	7.20	14.39	18.00	35.99	71.98	143.9	216.0	359.9	719.8
0.1408	7.18	14.35	17.95	35.88	71.78	143.5	215.3	358.8	717.8

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1410	7.16	14.31	17.90	35.78	71.58	143.1	214.7	357.8	715.8
0.1412	7.14	14.27	17.85	35.68	71.37	142.7	214.1	356.8	713.7
0.1414	7.12	14.23	17.80	35.58	71.17	142.3	213.5	355.8	711.7
0.1416	7.10	14.19	17.75	35.48	70.97	141.9	212.9	354.8	709.7
0.1418	7.08	14.15	17.70	35.38	70.77	141.5	212.3	353.8	707.7
0.1420	7.06	14.11	17.65	35.28	70.57	141.1	211.7	352.8	705.7
0.1422	7.04	14.07	17.60	35.18	70.37	140.7	211.1	351.8	703.7
0.1424	7.02	14.03	17.55	35.08	70.18	140.3	210.5	350.8	701.8
0.1426	7.00	13.99	17.50	34.98	69.98	139.9	209.9	349.8	699.8
0.1428	6.98	13.95	17.45	34.89	69.78	139.5	209.3	348.9	697.8
0.1430	6.96	13.91	17.40	34.79	69.59	139.1	208.8	347.9	695.9
0.1432	6.94	13.87	17.35	34.69	69.39	138.7	208.2	346.9	693.9
0.1434	6.92	13.84	17.30	34.60	69.20	138.4	207.6	346.0	692.0
0.1436	6.90	13.80	17.25	34.50	69.01	138.0	207.0	345.0	690.1
0.1438	6.88	13.76	17.21	34.40	68.82	137.6	206.4	344.0	688.2
0.1440	6.86	13.72	17.16	34.31	68.62	137.2	205.9	343.1	686.2
0.1442	6.84	13.68	17.11	34.21	68.43	136.8	205.3	342.1	684.3
0.1444	6.82	13.64	17.06	34.12	68.24	136.4	204.7	341.2	682.4
0.1446	6.81	13.61	17.02	34.02	68.06	136.1	204.2	340.2	680.6
0.1448	6.79	13.57	16.97	33.93	67.87	135.7	203.6	339.3	678.7
0.1450	6.77	13.53	16.92	33.84	67.68	135.3	203.0	338.4	676.8
0.1452	6.75	13.49	16.88	33.74	67.50	134.9	202.5	337.4	675.0
0.1454	6.73	13.46	16.83	33.65	67.31	134.6	201.9	336.5	673.1
0.1456	6.71	13.42	16.78	33.56	67.12	134.2	201.4	335.6	671.2
0.1458	6.69	13.38	16.74	33.47	66.94	133.8	200.8	334.7	669.4
0.1460	6.68	13.35	16.69	33.37	66.76	133.5	200.3	333.7	667.6
0.1462	6.66	13.31	16.65	33.28	66.57	133.1	199.7	332.8	665.7
0.1464	6.64	13.27	16.60	33.19	66.39	132.7	199.2	331.9	663.9
0.1466	6.62	13.24	16.56	33.10	66.21	132.4	198.6	331.0	662.1



(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1468	6.60	13.20	16.51	33.01	66.03	132.0	198.1	330.1	660.3
0.1470	6.59	13.17	16.47	32.92	65.85	131.7	197.6	329.2	658.5
0.1472	6.57	13.13	16.42	32.83	65.67	131.3	197.0	328.3	656.7
0.1474	6.55	13.09	16.38	32.74	65.50	130.9	196.5	327.4	655.0
0.1476	6.53	13.06	16.33	32.65	65.32	130.6	196.0	326.5	653.2
0.1478	6.51	13.02	16.29	32.57	65.14	130.2	195.4	325.7	651.4
0.1480	6.50	12.99	16.24	32.48	64.97	129.9	194.9	324.8	649.7
0.1482	6.48	12.95	16.20	32.39	64.79	129.5	194.4	323.9	647.9
0.1484	6.46	12.92	16.16	32.30	64.62	129.2	193.8	323.0	646.2
0.1486	6.44	12.88	16.11	32.22	64.44	128.8	193.3	322.2	644.4
0.1488	6.43	12.85	16.07	32.13	64.27	128.5	192.8	321.3	642.7
0.1490	6.41	12.81	16.03	32.04	64.10	128.1	192.3	320.4	641.0
0.1492	6.39	12.78	15.98	31.96	63.92	127.8	191.8	319.6	639.2
0.1494	6.38	12.75	15.94	31.84	63.75	127.5	191.3	318.7	637.5
0.1496	6.36	12.71	15.90	31.79	63.58	127.1	190.7	317.9	635.8
0.1498	6.34	12.68	15.86	31.70	63.41	126.8	190.2	317.0	634.1
0.1500	6.32	12.64	15.81	31.62	63.24	126.4	189.7	316.2	632.4
0.1502	6.31	12.61	15.77	31.53	63.08	126.1	189.2	315.3	630.8
0.1504	6.29	12.58	15.73	31.45	62.91	125.8	188.7	314.5	629.1
0.1506	6.27	12.54	15.69	31.37	62.74	125.4	188.2	313.7	627.4
0.1508	6.26	12.51	15.65	31.28	62.58	125.1	188.7	312.8	625.8
0.1510	6.24	12.48	15.60	31.20	62.41	124.8	187.2	312.0	624.1
0.1512	6.22	12.44	15.56	31.12	62.24	124.4	186.7	311.2	622.4
0.1514	6.21	12.41	15.52	31.04	62.08	124.1	186.2	310.4	620.8
0.1516	6.19	12.38	15.48	30.95	61.92	123.8	185.7	309.5	619.2
0.1518	6.18	12.35	15.44	30.87	61.75	123.5	185.3	308.7	617.5
0.1520	6.16	12.31	15.40	30.79	61.59	123.1	184.8	307.9	615.9
0.1522	6.14	12.28	15.36	30.71	61.43	122.8	184.3	307.1	614.3
0.1524	6.13	12.25	15.32	30.63	61.27	122.5	183.8	306.3	612.7

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1526	6.11	12.22	15.28	30.55	61.11	122.2	183.3	305.5	611.1
0.1528	6.09	12.19	15.24	30.47	60.95	121.9	182.8	304.7	609.5
0.1530	6.08	12.15	15.20	30.39	60.79	121.5	182.4	303.9	607.9
0.1532	6.06	12.12	15.16	30.31	60.63	121.2	181.9	303.1	606.3
0.1534	6.05	12.09	15.12	30.23	60.47	120.9	181.4	302.3	604.7
0.1536	6.03	12.06	15.08	30.15	60.31	120.6	180.9	301.5	603.1
0.1538	6.02	12.03	15.04	30.07	60.16	120.3	180.5	300.7	601.6
0.1540	6.00	12.00	15.00	30.00	60.00	120.0	180.0	300.0	600.0
0.1542	5.98	11.97	14.96	29.92	59.85	119.7	179.5	299.2	598.5
0.1544	5.97	11.93	14.92	29.84	59.69	119.3	179.1	298.4	596.9
0.1546	5.95	11.90	14.89	29.76	59.54	119.0	178.6	297.6	595.4
0.1548	5.94	11.87	14.85	29.69	59.38	118.7	178.1	296.9	593.8
0.1550	5.92	11.84	14.81	29.61	59.23	118.4	177.7	296.1	592.3
0.1552	5.91	11.81	14.77	29.53	59.08	118.1	177.2	295.3	590.8
0.1554	5.89	11.78	14.73	29.46	58.93	117.8	176.8	294.6	589.3
0.1556	5.88	11.75	14.70	29.38	58.77	117.5	176.3	293.8	587.7
0.1558	5.86	11.72	14.66	29.31	58.62	117.2	175.9	293.1	586.2
0.1560	5.85	11.69	14.62	29.23	58.47	116.9	175.4	292.3	584.7
0.1562	5.83	11.66	14.58	29.16	58.32	116.6	175.0	291.6	583.2
0.1564	5.82	11.63	14.55	29.08	58.17	116.3	174.5	290.8	581.7
0.1566	5.80	11.60	14.51	29.01	58.03	116.0	174.1	290.1	580.3
0.1568	5.79	11.57	14.47	28.93	57.88	115.7	173.6	289.3	578.8
0.1570	5.77	11.54	14.43	28.86	57.73	115.4	173.2	288.6	577.3
0.1572	5.76	11.51	14.40	28.79	57.58	115.1	172.8	287.9	575.8
0.1574	5.74	11.48	14.36	28.71	57.44	114.8	172.3	287.1	574.4
0.1576	5.73	11.45	14.32	28.64	57.29	114.5	171.9	286.4	572.9
0.1578	5.71	11.43	14.29	28.57	57.15	114.3	171.4	285.7	571.5
0.1580	5.70	11.40	14.25	28.50	57.00	114.0	171.0	285.0	570.0
0.1582	5.69	11.37	14.22	28.43	56.86	113.7	170.6	284.3	568.6

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1584	5.67	11.34	14.18	28.35	56.71	113.4	170.1	283.5	567.1
0.1586	5.66	11.31	14.14	28.28	56.57	113.1	169.7	282.8	565.7
0.1588	5.64	11.28	14.11	28.11	56.43	112.8	169.3	282.1	564.3
0.1590	5.63	11.25	14.07	28.14	56.29	112.5	168.9	281.4	562.9
0.1592	5.61	11.23	14.04	28.07	56.15	112.3	168.4	280.7	561.5
0.1594	5.60	11.20	14.00	28.00	56.01	112.0	168.0	280.0	560.1
0.1596	5.59	11.17	13.97	27.93	55.86	111.7	167.6	279.3	558.6
0.1598	5.57	11.14	13.93	27.86	55.73	111.4	167.2	278.6	557.8
0.1600	5.56	11.11	13.90	27.79	55.59	111.1	166.8	277.9	555.9
0.1602	5.54	11.09	13.86	27.72	55.45	110.9	166.3	277.2	554.5
0.1604	5.53	11.06	13.83	27.65	55.31	110.6	165.9	276.5	553.1
0.1606	5.52	11.03	13.79	27.58	55.17	110.3	165.5	275.8	551.7
0.1608	5.50	11.00	13.76	27.51	55.03	110.0	165.1	275.1	550.3
0.1610	5.49	10.98	13.73	27.44	54.90	109.8	164.7	274.4	549.0
0.1612	5.48	10.95	13.69	27.38	54.76	109.5	164.3	273.8	547.6
0.1614	5.46	10.92	13.66	27.31	54.63	109.2	163.9	273.1	546.3
0.1616	5.45	10.89	13.62	27.24	54.49	108.9	163.5	272.4	544.9
0.1618	5.44	10.87	13.59	27.17	54.36	108.7	163.1	271.7	543.6
0.1620	5.42	10.84	13.56	27.11	54.22	108.4	162.7	271.1	542.2
0.1622	5.41	10.81	13.52	27.04	54.09	108.1	162.3	270.4	540.9
0.1624	5.40	10.79	13.49	26.97	53.96	107.9	161.9	269.7	539.6
0.1626	5.38	10.76	13.46	26.91	53.82	107.6	161.5	269.1	538.2
0.1628	5.37	10.73	13.42	26.84	53.69	107.3	161.1	268.4	536.9
0.1630	5.36	10.71	13.39	26.78	53.56	107.1	160.7	267.8	535.6
0.1632	5.34	10.68	13.36	26.71	53.43	106.8	160.3	267.1	534.3
0.1634	5.33	10.66	13.33	26.64	53.30	106.6	159.9	266.4	533.0
0.1636	5.32	10.63	13.29	26.58	53.17	106.3	159.5	265.8	531.7
0.1638	5.30	10.60	13.26	26.51	53.04	106.0	159.1	265.1	530.4
0.1640	5.29	10.58	13.23	26.45	52.91	105.8	158.7	264.5	529.1

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1642	5.28	10.55	13.20	26.39	52.78	105.5	158.3	263.9	527.8
0.1644	5.27	10.53	13.16	26.32	52.65	105.3	158.0	263.2	526.5
0.1646	5.25	10.50	13.13	26.26	52.52	105.0	157.6	262.6	525.2
0.1648	5.24	10.48	13.10	26.19	52.40	104.8	157.2	261.9	524.0
0.1650	5.23	10.45	13.07	26.13	52.27	104.5	156.8	261.3	522.7
0.1652	5.21	10.42	13.04	26.07	52.14	104.2	156.4	260.7	521.4
0.1654	5.20	10.40	13.01	26.00	52.02	104.0	156.0	260.0	520.2
0.1656	5.19	10.37	12.97	25.94	51.89	103.7	155.7	259.4	518.9
0.1658	5.18	10.35	12.94	25.88	51.76	103.5	155.3	258.8	517.6
0.1660	5.16	10.32	12.91	25.82	51.64	103.2	154.9	258.2	516.4
0.1662	5.15	10.30	12.88	25.75	51.52	103.0	154.5	257.5	515.2
0.1664	5.14	10.27	12.85	25.69	51.39	102.7	154.2	256.9	513.9
0.1666	5.13	10.25	12.82	25.63	51.27	102.5	153.8	256.3	512.7
0.1668	5.11	10.23	12.79	25.57	51.15	102.3	153.4	255.7	511.5
0.1670	5.10	10.20	12.76	25.51	51.02	102.0	153.1	255.1	510.2
0.1672	5.09	10.18	12.73	25.45	50.90	101.8	152.7	254.5	509.0
0.1674	5.08	10.15	12.70	25.39	50.78	101.5	152.3	253.9	507.8
0.1676	5.07	10.13	12.67	25.33	50.66	101.3	152.0	253.3	506.6
0.1678	5.05	10.10	12.64	25.27	50.54	101.0	151.6	252.7	505.4
0.1680	5.04	10.08	12.61	25.21	50.42	100.8	151.3	252.1	504.2
0.1682	5.03	10.06	12.58	25.15	50.30	100.6	150.9	251.5	503.0
0.1684	5.02	10.03	12.55	25.09	50.18	100.3	150.5	250.9	501.8
0.1686	5.01	10.01	12.52	25.03	50.06	100.1	150.2	250.3	500.6
0.1688	4.99	9.98	12.49	24.97	49.94	99.85	149.8	249.7	499.4
0.1690	4.98	9.96	12.46	24.91	49.82	99.61	149.5	249.1	498.2
0.1692	4.97	9.94	12.43	24.85	49.71	99.38	149.1	248.5	497.1
0.1694	4.96	9.91	12.40	24.79	49.59	99.14	148.8	247.9	495.9
0.1696	4.95	9.89	12.37	24.73	49.47	98.91	148.4	247.3	494.7
0.1698	4.94	9.87	12.34	24.67	49.35	98.67	148.1	246.7	493.5

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1700	4.92	9.84	12.31	24.62	49.24	98.44	147.7	246.2	492.4
0.1702	4.91	9.82	12.28	24.56	49.12	98.21	147.4	245.6	491.2
0.1704	4.90	9.80	12.25	24.50	49.01	97.98	147.0	245.0	490.1
0.1706	4.89	9.78	12.22	24.44	48.89	97.75	146.7	244.4	488.9
0.1708	4.88	9.75	12.20	24.39	48.78	97.52	146.3	243.9	487.8
0.1710	4.87	9.73	12.17	24.33	48.66	97.29	146.0	243.3	486.6
0.1712	4.86	9.71	12.14	24.27	48.55	97.07	145.7	242.7	485.5
0.1714	4.84	9.68	12.11	24.22	48.44	96.84	145.3	242.2	484.4
0.1716	4.83	9.66	12.08	24.16	48.32	96.62	145.0	241.6	483.2
0.1718	4.82	9.64	12.05	24.10	48.21	96.39	144.6	241.0	482.1
0.1720	4.81	9.62	12.03	24.05	48.10	96.17	144.3	240.5	481.0
0.1722	4.80	9.59	12.00	23.99	47.99	95.94	144.0	239.9	479.9
0.1724	4.79	9.57	11.97	23.94	47.88	95.72	143.6	239.4	478.8
0.1726	4.78	9.55	11.94	23.88	47.77	95.50	143.3	238.8	477.7
0.1728	4.77	9.53	11.92	23.82	47.66	95.28	143.0	238.2	476.6
0.1730	4.75	9.51	11.89	23.77	47.55	95.06	142.6	237.7	475.5
0.1732	4.74	9.48	11.86	23.71	47.44	94.84	142.3	237.1	474.4
0.1734	4.73	9.46	11.83	23.66	47.33	94.62	142.0	236.6	473.3
0.1736	4.72	9.44	11.81	23.61	47.22	94.40	141.7	236.1	472.2
0.1738	4.71	9.42	11.78	23.55	47.11	94.19	141.3	235.5	471.1
0.1740	4.70	9.40	11.75	23.50	47.00	93.97	141.0	235.0	470.0
0.1742	4.69	9.38	11.72	23.44	46.89	93.75	140.7	234.4	468.9
0.1744	4.68	9.35	11.70	23.39	46.79	93.54	140.4	233.9	467.9
0.1746	4.67	9.33	11.67	23.34	46.68	93.32	140.0	233.4	466.8
0.1748	4.66	9.31	11.64	23.28	46.57	93.11	139.7	232.8	465.7
0.1750	4.65	9.29	11.62	23.23	46.47	92.90	139.4	232.3	464.7
0.1752	4.64	9.27	11.59	23.18	46.36	92.69	139.1	231.8	463.6
0.1754	4.63	9.25	11.57	23.12	46.25	92.47	138.8	231.2	462.5
0.1756	4.61	9.23	11.54	23.07	46.15	92.26	138.4	230.7	461.5

(续)

压痕对角线 d/mm	试验力/N								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1758	4.60	9.21	11.51	23.02	46.04	92.05	138.1	230.2	460.4
0.1760	4.59	9.18	11.49	22.97	45.94	91.85	137.8	229.7	459.4
0.1762	4.58	9.16	11.46	22.91	45.83	91.64	137.5	229.1	458.3
0.1764	4.57	9.14	11.43	22.86	45.73	91.43	137.2	228.6	457.3
0.1766	4.56	9.12	11.41	22.81	45.63	91.22	136.9	228.1	456.3
0.1768	4.55	9.10	11.38	22.76	45.52	91.02	136.6	227.6	455.2
0.1770	4.54	9.08	11.36	22.71	45.42	90.81	136.3	227.1	454.2
0.1772	4.53	9.06	11.33	22.66	45.32	90.61	136.0	226.6	453.2
0.1774	4.52	9.04	11.31	22.61	45.22	90.40	135.6	226.1	452.2
0.1776	4.51	9.02	11.28	22.55	45.11	90.20	135.3	225.5	451.1
0.1778	4.50	9.00	11.25	22.50	45.01	90.00	135.0	225.0	450.1
0.1780	4.49	8.98	11.23	22.45	44.91	89.79	134.7	224.5	449.1
0.1782	4.48	8.96	11.20	22.40	44.81	89.59	134.4	224.0	448.1
0.1784	4.47	8.94	11.18	22.35	44.71	89.39	134.1	223.5	447.1
0.1786	4.46	8.92	11.15	22.30	44.61	89.19	133.8	223.0	446.1
0.1788	4.45	8.90	11.13	22.25	44.51	88.99	133.5	222.5	445.1
0.1790	4.44	8.88	11.10	22.20	44.41	88.79	133.2	222.0	444.1
0.1792	4.43	8.86	11.08	22.15	44.31	88.59	132.9	221.5	443.1
0.1794	4.42	8.84	11.06	22.10	44.21	88.40	132.6	221.0	442.1
0.1796	4.41	8.82	11.03	22.05	44.12	88.20	132.3	220.5	441.2
0.1798	4.40	8.80	11.01	22.01	44.02	88.00	132.1	220.1	440.2
0.1800	4.39	8.78	10.98	21.96	43.92	87.81	131.8	219.6	439.2
0.1802	4.38	8.76	10.96	21.91	43.82	87.61	131.5	219.1	438.2
0.1804	4.37	8.74	10.93	21.86	43.73	87.42	131.2	218.6	437.3
0.1806	4.36	8.72	10.91	21.81	43.63	87.23	130.9	218.1	436.3
0.1808	4.35	8.70	10.88	21.76	43.53	87.03	130.6	217.6	435.3
0.1810	4.34	8.68	10.86	21.71	43.44	86.84	130.3	217.1	434.4
0.1812	4.33	8.66	10.84	21.67	43.34	86.65	130.0	216.7	433.4
0.1814	4.32	8.65	10.81	21.62	43.24	86.46	129.7	216.2	432.4
0.1816	4.31	8.63	10.79	21.57	43.15	86.27	129.4	215.7	431.5
0.1818	4.31	8.61	10.77	21.52	43.05	86.08	129.2	215.2	430.5



(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1820	4.30	8.59	10.74	21.48	42.96	85.89	128.9	214.8	429.6
0.1822	4.29	8.57	10.72	21.43	42.87	85.70	128.6	214.3	428.7
0.1824	4.28	8.55	10.69	21.38	42.77	85.51	128.3	213.8	427.7
0.1826	4.27	8.53	10.67	21.34	42.68	85.33	128.0	213.4	426.8
0.1828	4.26	8.51	10.65	21.29	42.58	85.14	127.8	212.9	425.8
0.1830	4.25	8.50	10.62	21.24	42.49	84.95	127.5	212.4	424.9
0.1832	4.24	8.48	10.60	21.20	42.40	84.77	127.2	212.0	424.0
0.1834	4.23	8.46	10.58	21.15	42.31	84.58	126.9	211.5	423.1
0.1836	4.22	8.44	10.56	21.10	42.21	84.40	126.6	211.0	422.1
0.1838	4.21	8.42	10.53	21.06	42.12	84.22	126.4	210.6	421.2
0.1840	4.20	8.40	10.51	21.01	42.03	84.03	126.1	210.1	420.3
0.1842	4.19	8.38	10.49	20.97	41.94	83.85	125.8	209.7	419.4
0.1844	4.18	8.37	10.46	20.92	41.85	83.67	125.5	209.2	418.5
0.1846	4.18	8.35	10.44	20.88	41.76	83.49	125.3	208.8	417.6
0.1848	4.17	8.33	10.42	20.83	41.67	83.31	125.0	208.3	416.7
0.1850	4.16	8.31	10.40	20.79	41.58	83.13	124.7	207.9	415.8
0.1852	4.15	8.29	10.37	20.74	41.49	82.95	124.5	207.4	414.9
0.1854	4.14	8.28	10.35	20.70	41.40	82.77	124.2	207.0	414.0
0.1856	4.13	8.26	10.33	20.65	41.31	82.59	123.9	206.5	413.1
0.1858	4.12	8.24	10.31	20.61	41.22	82.41	123.7	206.1	412.2
0.1860	4.11	8.22	10.28	20.56	41.13	82.23	123.4	205.6	411.3
0.1862	4.10	8.21	10.26	20.52	41.04	82.06	123.1	205.2	410.4
0.1864	4.10	8.19	10.24	20.47	40.96	81.88	122.9	204.7	409.6
0.1866	4.09	8.17	10.22	20.43	40.87	81.71	122.6	204.3	408.7
0.1868	4.08	8.15	10.20	20.39	40.78	81.53	122.3	203.9	407.8
0.1870	4.07	8.14	10.17	20.34	40.69	81.36	122.1	203.4	406.9
0.1872	4.06	8.12	10.15	20.30	40.61	81.18	121.8	203.0	406.1
0.1874	4.05	8.10	10.13	20.26	40.52	81.01	121.6	202.6	405.2
0.1876	4.04	8.08	10.11	20.21	40.43	80.84	121.3	202.1	404.3
0.1878	4.03	8.07	10.09	20.17	40.35	80.67	121.0	201.7	403.5
0.1880	4.03	8.05	10.07	20.13	40.26	80.49	120.8	201.3	402.6

(续)

压痕对角线 $d/mm$	试验力/ $N$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1882	4.02	8.03	10.05	20.09	40.18	80.32	120.5	200.9	401.8
0.1884	4.01	8.02	10.02	20.04	40.09	80.15	120.3	200.4	400.9
0.1886	4.00	8.00	10.00	20.00	40.01	79.98	120.0	200.0	400.1
0.1888	3.99	7.98	9.98	19.96	39.92	79.81	119.8	199.6	399.2
0.1890	3.98	7.96	9.96	19.92	39.84	79.65	119.5	199.2	398.4
0.1892	3.98	7.95	9.94	19.87	39.75	79.48	119.3	198.7	397.5
0.1894	3.97	7.93	9.92	19.83	39.67	79.31	119.0	198.3	396.7
0.1896	3.96	7.91	9.90	19.79	39.58	79.14	118.8	197.9	395.8
0.1898	3.95	7.90	9.88	19.75	39.50	78.98	118.5	197.5	395.0
0.1900	3.94	7.88	9.86	19.71	39.42	78.81	118.3	197.1	394.2
0.1902	3.93	7.86	9.84	19.66	39.34	78.64	118.0	196.6	393.4
0.1904	3.93	7.85	9.81	19.62	39.25	78.48	117.8	196.2	392.5
0.1906	3.92	7.83	9.79	19.58	39.17	78.31	117.5	195.8	391.7
0.1908	3.91	7.81	9.77	19.54	39.09	78.15	117.3	195.4	390.9
0.1910	3.90	7.80	9.75	19.50	39.01	77.99	117.0	195.0	390.1
0.1912	3.89	7.78	9.73	19.46	38.93	77.82	116.8	194.6	389.3
0.1914	3.88	7.77	9.71	19.42	38.84	77.66	116.5	194.2	388.4
0.1916	3.88	7.75	9.69	19.38	38.76	77.50	116.3	193.8	387.6
0.1918	3.87	7.73	9.67	19.34	38.68	77.34	116.0	193.4	386.8
0.1920	3.86	7.72	9.65	19.30	38.60	77.18	115.8	193.0	386.0
0.1922	3.85	7.70	9.63	19.26	38.52	77.02	115.6	192.6	385.2
0.1924	3.84	7.69	9.61	19.22	38.44	76.85	115.3	192.2	384.4
0.1926	3.84	7.67	9.59	19.18	38.36	76.70	115.1	191.8	383.6
0.1928	3.83	7.65	9.57	19.14	38.28	76.54	114.8	191.4	382.8
0.1930	3.82	7.64	9.55	19.10	38.20	76.38	114.6	191.0	382.0
0.1932	3.81	7.62	9.53	19.06	38.12	76.22	114.4	190.6	381.2
0.1934	3.80	7.61	9.51	19.02	38.04	76.06	114.1	190.2	380.4
0.1936	3.80	7.59	9.49	18.98	37.97	75.91	113.9	189.8	379.7
0.1938	3.79	7.57	9.47	18.94	37.89	75.75	113.7	189.4	378.9
0.1940	3.78	7.56	9.45	18.90	37.81	75.59	113.4	189.0	378.1
0.1942	3.77	7.54	9.43	18.86	37.73	75.44	113.2	188.6	377.3

(续)

压痕对角线 $d/\text{mm}$	试验力/ $\text{N}$								
	0.09807	0.1961	0.2452	0.4903	0.9807	1.9612	2.9420	4.903	9.807
	努氏硬度								
	HK0.01	HK0.02	HK0.025	HK0.05	HK0.1	HK0.2	HK0.3	HK0.5	HK1
0.1944	3.77	7.53	9.41	18.82	37.65	75.28	113.0	188.2	376.5
0.1946	3.76	7.51	9.40	18.79	37.58	75.13	112.7	187.9	375.8
0.1948	3.75	7.50	9.38	18.75	37.50	74.97	112.5	187.5	375.0
0.1950	3.74	7.48	9.36	18.71	37.42	74.82	112.3	187.1	374.2
0.1952	3.73	7.47	9.34	18.67	37.35	74.67	112.0	186.7	373.5
0.1954	3.73	7.45	9.32	18.63	37.27	74.51	111.8	186.3	372.7
0.1956	3.72	7.44	9.30	18.59	37.19	74.36	111.6	185.9	371.9
0.1958	3.71	7.42	9.28	18.56	37.12	74.21	111.4	185.6	371.2
0.1960	3.70	7.41	9.26	18.52	37.04	74.06	111.1	185.2	370.4
0.1962	3.70	7.39	9.24	18.48	36.97	73.91	110.9	184.8	369.7
0.1964	3.69	7.38	9.22	18.44	36.89	73.76	110.7	184.4	368.9
0.1966	3.68	7.36	9.21	18.41	36.82	73.61	110.4	184.1	368.2
0.1968	3.67	7.35	9.19	18.37	36.74	73.46	110.2	183.7	367.4
0.1970	3.67	7.33	9.17	18.33	36.67	73.31	110.0	183.3	366.7
0.1972	3.66	7.32	9.15	18.29	36.59	73.16	109.8	182.9	365.9
0.1974	3.65	7.30	9.13	18.26	36.52	73.01	109.6	182.6	365.2
0.1976	3.64	7.29	9.11	18.22	36.44	72.86	109.3	182.2	364.4
0.1978	3.64	7.27	9.09	18.18	36.37	72.72	109.1	181.8	363.7
0.1980	3.63	7.26	9.08	18.15	36.30	72.57	108.9	181.5	363.0
0.1982	3.62	7.24	9.06	18.11	36.22	72.42	108.7	181.1	362.2
0.1984	3.62	7.23	9.04	18.07	36.15	72.28	108.5	180.7	361.5
0.1986	3.61	7.21	9.02	18.04	36.08	72.13	108.2	180.4	360.8
0.1988	3.60	7.20	9.00	18.00	36.01	71.99	108.0	180.0	360.1
0.1990	3.59	7.18	8.98	17.96	35.93	71.84	107.8	179.6	359.3
0.1992	3.59	7.17	8.97	17.93	35.86	71.70	107.6	179.3	358.6
0.1994	3.58	7.16	8.95	17.89	35.79	71.55	107.4	178.9	357.8
0.1996	3.57	7.14	8.93	17.86	35.72	71.41	107.2	178.6	357.2
0.1998	3.56	7.13	8.91	17.82	35.65	71.27	106.9	178.2	356.5
0.2000	3.56	7.11	8.90	17.79	35.58	71.13	106.7	177.9	355.8

### 3.5.5 肖氏硬度的测定

#### 1. 试验原理

将规定形状的金刚石冲头从固定的高度  $h_0$  落在试样表面上，冲头弹起一定高度  $h$ ，用下式计算肖氏硬度值：

$$\text{肖氏硬度} = K \frac{h}{h_0} \quad (3-5)$$

式中  $h_0$ ——固定的高度，单位为 mm；

$h$ ——冲头弹起的高度，单位为 mm；

$K$ ——肖氏硬度系数，对于目测型（C 型）肖氏硬度计， $K$  取  $10^3/65$ ；对于指示型（D 型）肖氏硬度计， $K$  取 140。

#### 2. 硬度值的表示

肖氏硬度符号为 HS，HS 后面的符号表示硬度计类型。如 28HSC 表示用 C 型（目测型）肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 28，50HSD 表示用 D 型（指示型）肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 50。

#### 3. 试验程序

1) 试验时，试样应稳固地放置在机架的试台上。由于试样的形状、尺寸、质量等关系，需将测量筒从机架上取下，以手持或安放在特殊形状的支架上使用。试验结果应注明手持测量或支架测量。

2) 硬度计应安置在稳固的基础上，试验时测量筒应保持垂直状态，试验面应与冲头作用方向垂直。手持测量筒时，要特别注意保持垂直状态。

3) 测量硬度时，试样在试台上受到的压力约为 200N。试样质量在 20kg 以上，手持测量筒或在特殊形状的支架上进行试验时，对测量筒的压力应以测量筒在试样上保持稳定为宜。

4) 对于 D 型肖氏硬度计，操作鼓轮的回转时间约为 1s，复位时的操作以手动缓慢进行。对于 C 型肖氏硬度计，读取冲头反弹最高位置时的瞬间读数。

5) 试样两相邻压痕中心距离应不小于 1mm，压痕中心距试样边缘的距离应不小于 4mm。

6) 肖氏硬度值的读数应精确至 0.5HS，以连续 5 次有效读数的平均值作为一个肖氏硬度测量值。

### 3.5.6 里氏硬度的测定

#### 1. 试验原理

用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定速度冲击试样表面，用冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算公式为

$$\text{里氏硬度} = 1000 \frac{v_R}{v_A} \quad (3-6)$$

式中  $v_R$ ——冲击体回弹速度, 单位为 mm/s;  
 $v_A$ ——冲击体冲击速度, 单位为 mm/s。

## 2. 硬度值的表示

在里氏硬度符号 HL 前示出硬度数值, 在 HL 后面示出冲击装置类型 (包括 D、DC、G、C 型)。例如 700HLD 表示用 D 型冲击装置测定的里氏硬度值为 700。对于用里氏硬度换算的其他硬度, 应在里氏硬度符号之前附以相应的硬度符号。例如, 400HVHLD 表示用 D 型冲击装置测定的里氏硬度值换算的维氏硬度值为 400。

## 3. 试验程序

- 1) 向下推动加载套或用其他方式锁住冲击体。
- 2) 将冲击装置支撑环紧压在试样表面上, 冲击方向应与试验面垂直。
- 3) 平稳地按动冲击装置释放钮。
- 4) 读取硬度示值。
- 5) 试验时冲击装置尽可能垂直向下。

6) 对于需要耦合的试样, 试验面应与支承台面平行, 试样背面和支承台面必须平坦光滑, 在耦合的平面上涂以适量的耦合剂, 使试样与支承台在垂直耦合面的方向上成为承受压力的刚性整体。试验时, 冲击方向必须垂直于耦合平面, 一般用凡士林作为耦合剂。

7) 对于大面积板材、长杆、弯曲件等试样, 在试验时应进行适当的支承及固定, 以保证冲击时不产生位移及弹动。

8) 任意两压痕中心之间距离或任一压痕中心距试样边缘距离应符合表 3-22 的规定。

表 3-22 压痕距离的要求 (单位: mm)

冲击装置类型	两压痕中心间距离	压痕中心距试样边缘距离
	$\geq$	$\geq$
D、DC 型	3	5
G 型	4	8
C 型	2	4

9) 试样的每个测量部位一般进行 5 次试验, 数据分散不应超过平均值的  $\pm 15\text{HL}$ 。

3.5.7 焊接接头硬度的测定

1. 标线测定 (R)

1) 图 3-13 ~ 图 3-19 给出了标线测定测点位置示例图, 包括标线距表面的距离, 通过这些测点可以对接头进行评定。必要时, 可以增加标线数量和 (或) 在其他位置测定。测点位置应在试验报告中说明。

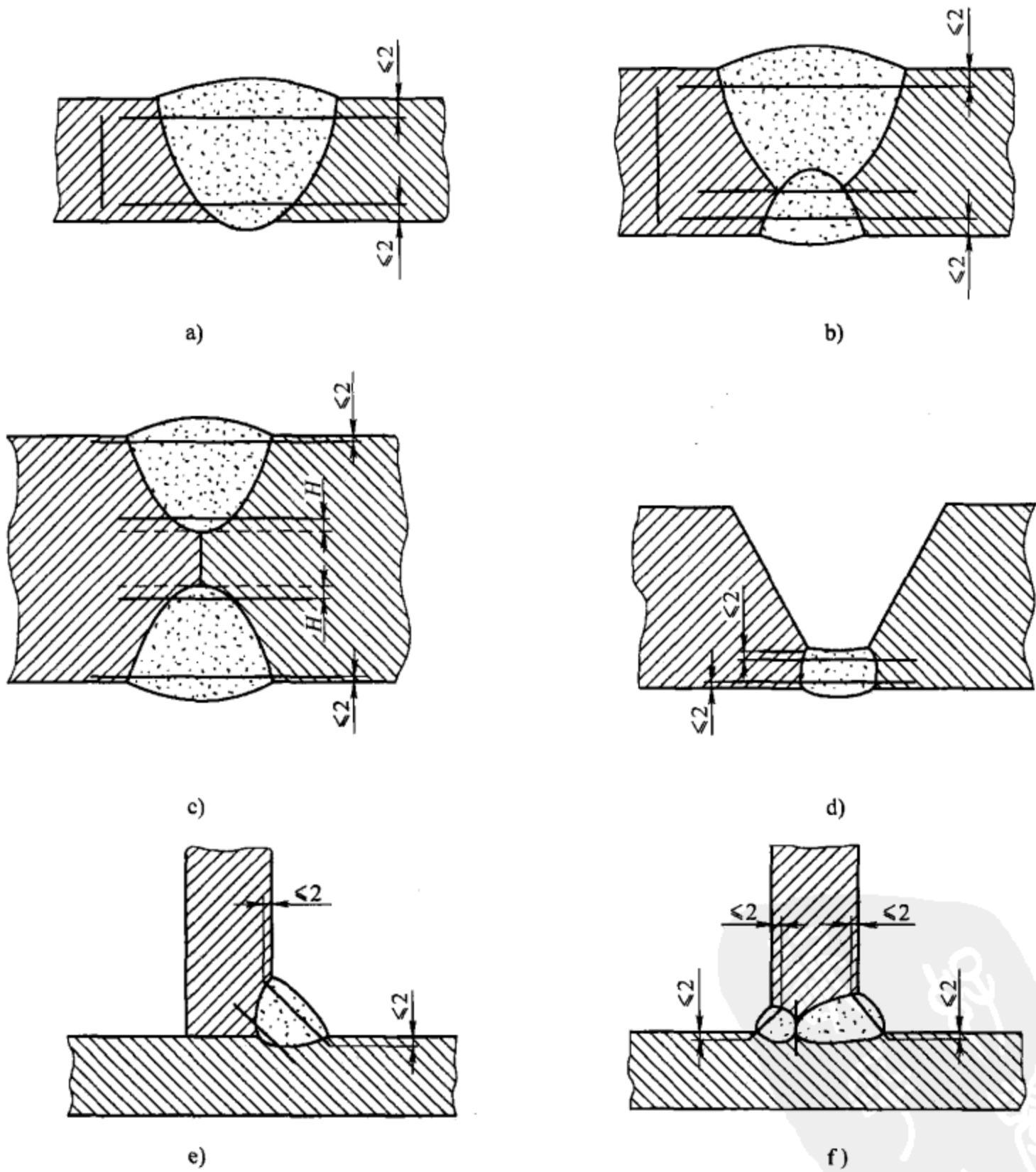


图 3-13 钢焊缝标线测定 (R) 示例

a) 单面焊对接焊缝 b) 双面焊对接焊缝 c) 双面焊部分熔透对接焊缝  
d) 用于对单道根部焊缝硬化程度的评估 e) 角焊缝 f) T 形接头

H—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离 (mm)



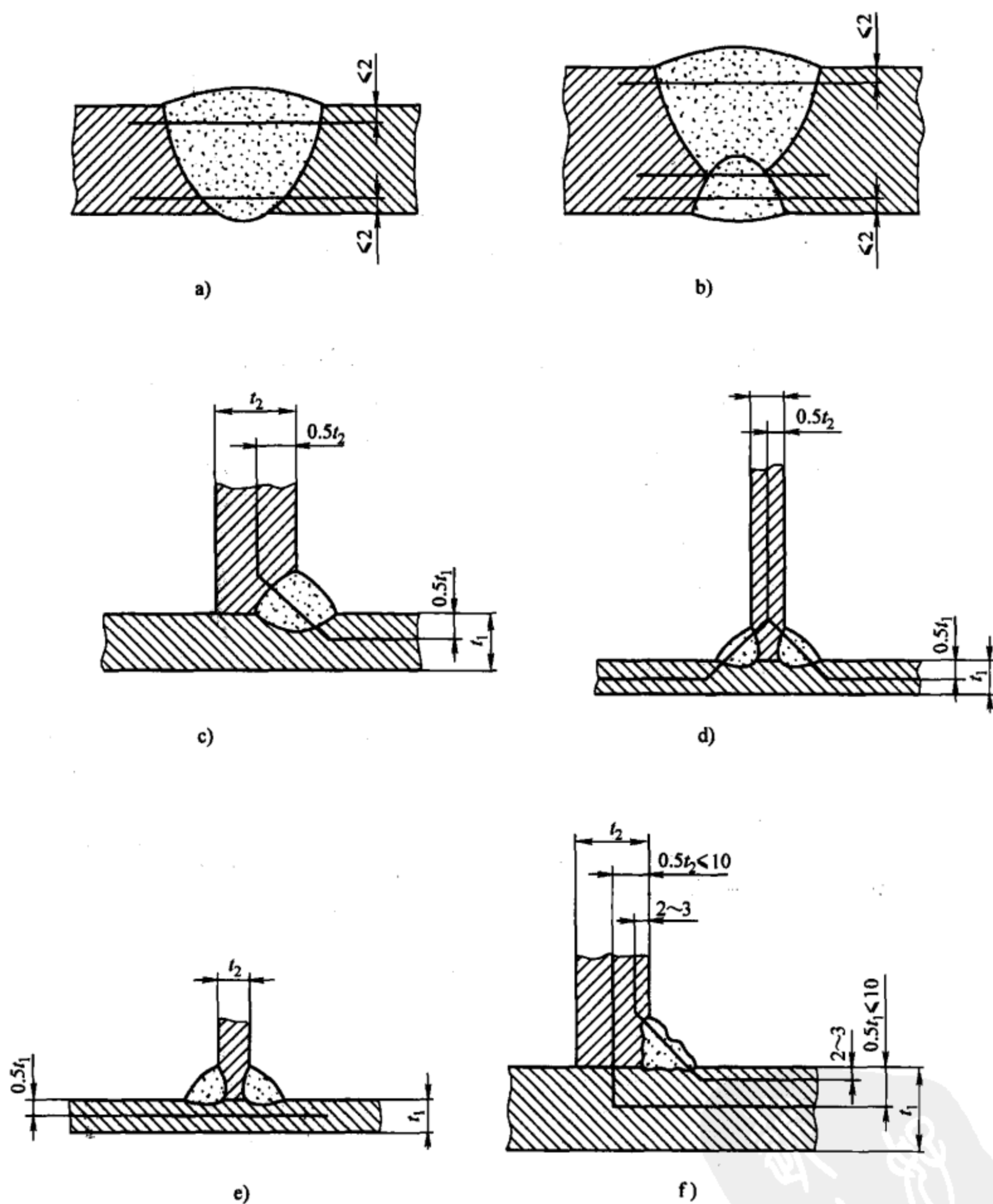


图 3-14 铝、铜及其合金焊缝标线测定 (R) 示例

- a) 单面焊对接焊缝 b) 双面焊对接焊缝 c) 单面角焊缝  
d) 双面角焊缝 (单道) e) 双面角焊缝 (单道, 肋板不承载)  
f) 单面角焊缝 (多道)

$t_1$ —横板试样的厚度 (mm)  $t_2$ —立板试样的厚度 (mm)

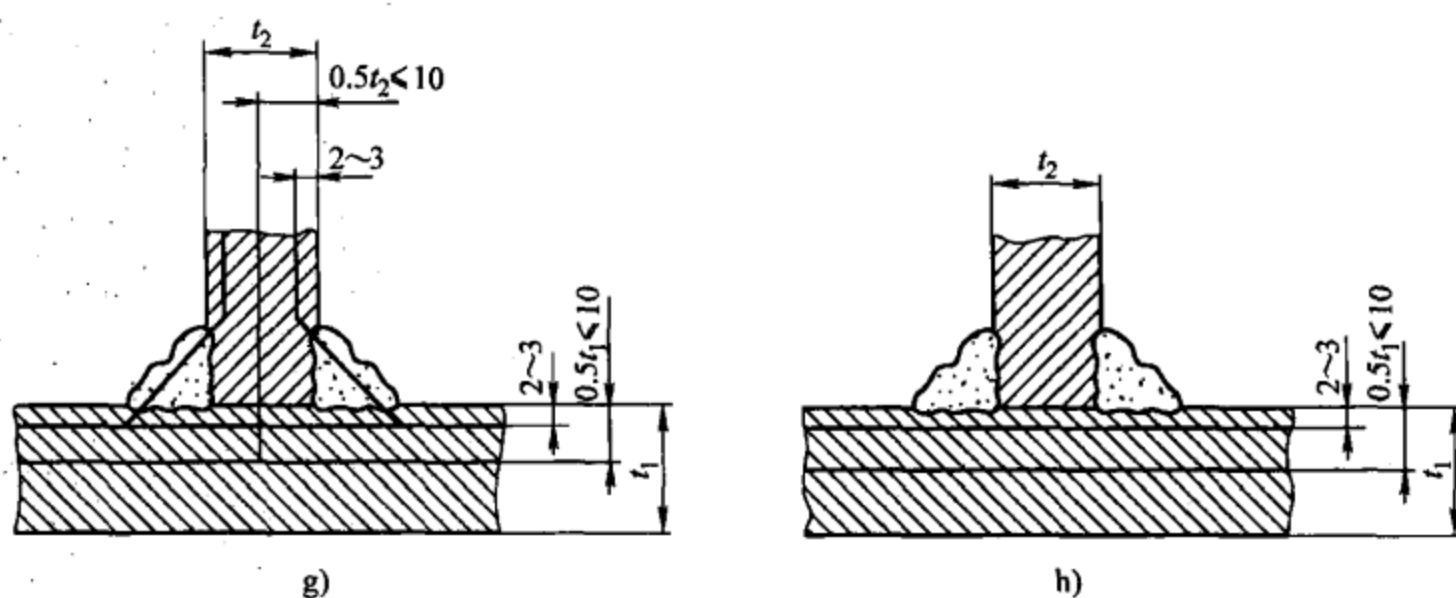


图 3-14 铝、铜及其合金焊缝标线测定 (R) 示例 (续)

g) 双面角焊缝 (多道) h) 双面角焊缝 (多道, 肋板不承载)

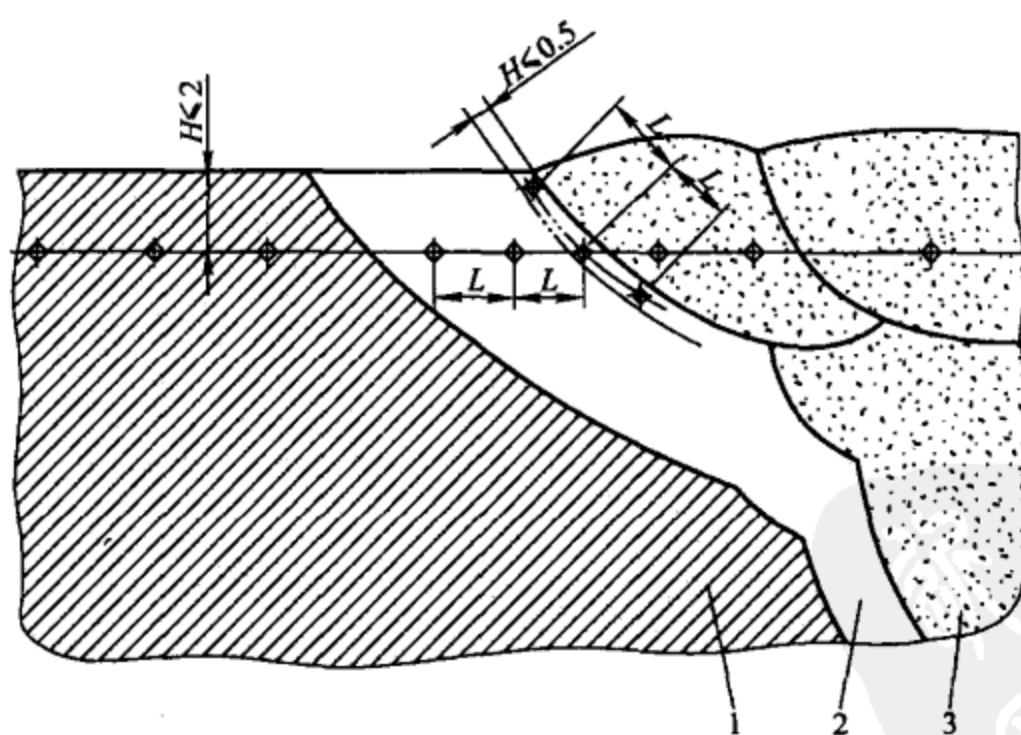
 $t_1$ —横板试样的厚度 (mm)  $t_2$ —立板试样的厚度 (mm)

图 3-15 钢 (奥氏体钢除外) 对接焊缝的测点位置

1—母材 2—热影响区 3—焊缝金属

 $H$ —标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离 (mm) $L$ —在热影响区两个相邻测点中心的距离

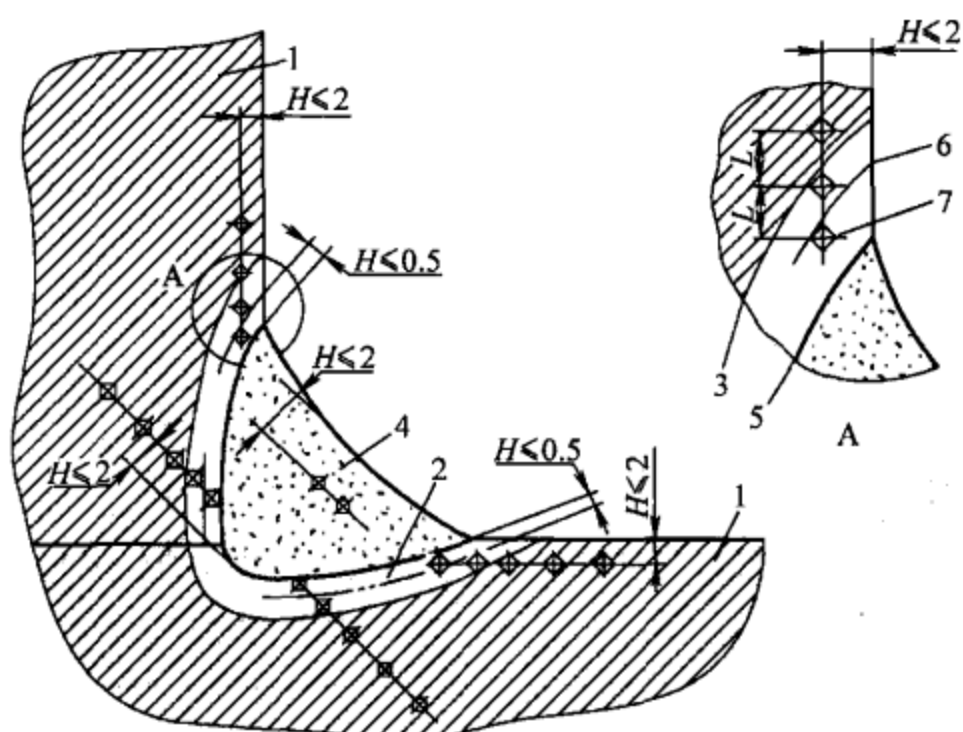


图 3-16 钢（奥氏体钢除外）角焊缝的测点位置

1—母材 2—热影响区 3—热影响区靠近母材侧区域 4—焊缝金属  
5—熔合线 6—热影响区靠近熔合线侧区域 7—第一个检测点位置

$H$ —标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离 (mm)

$L$ —在热影响区两个相邻测点中心的距离

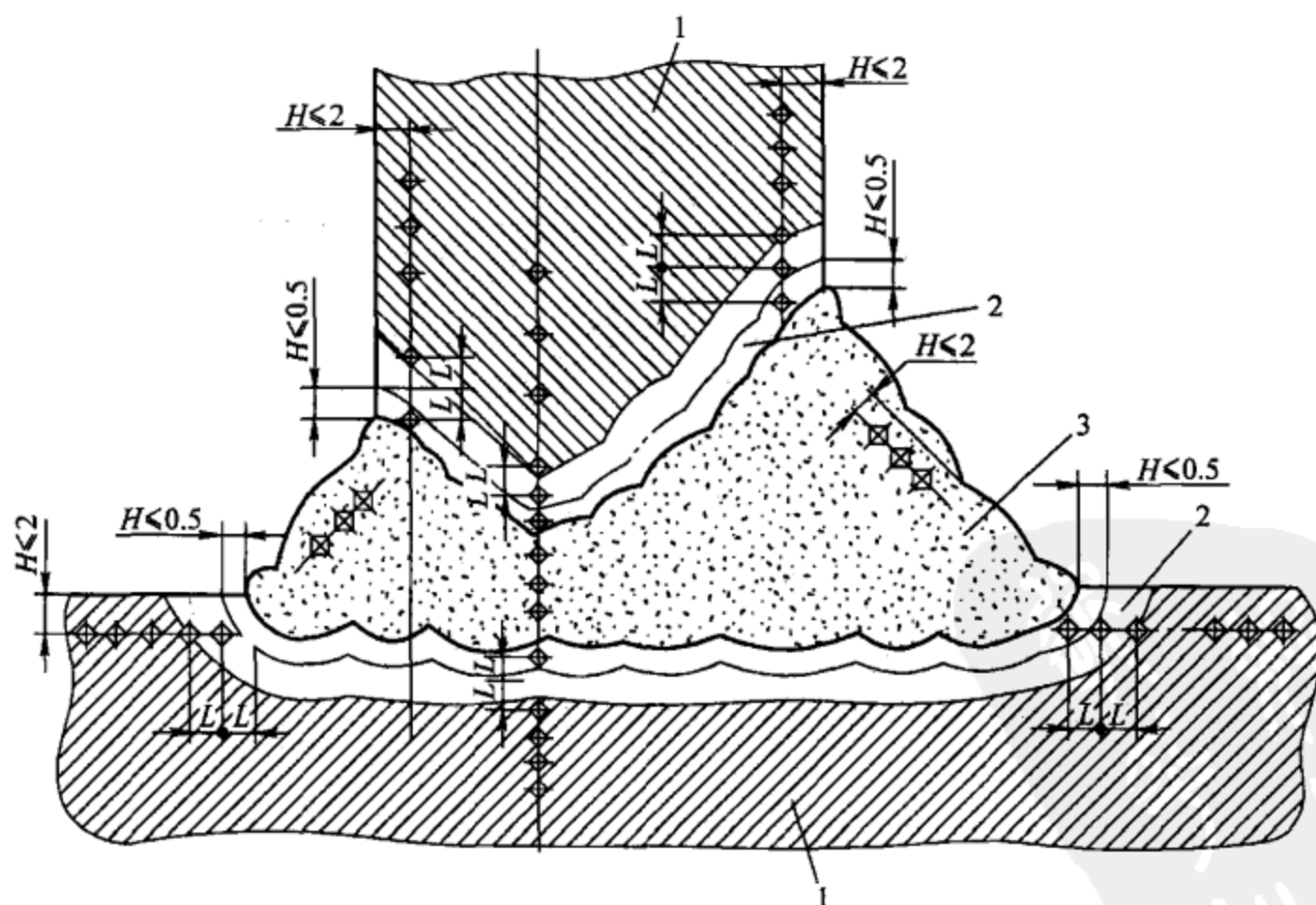


图 3-17 钢（奥氏体钢除外）T形接头的测点位置

1—母材 2—热影响区 3—焊缝金属

$H$ —标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离 (mm)

$L$ —在热影响区两个相邻测点中心的距离

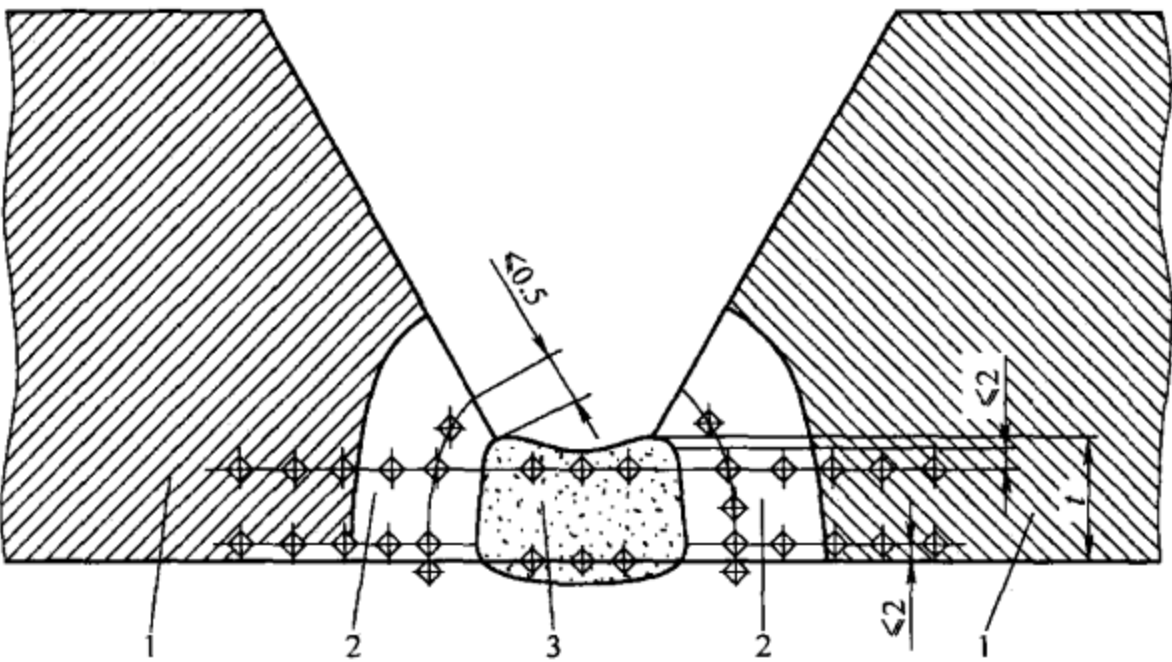


图 3-18 钢根部单道焊缝评估硬化程度的测点位置  
1—母材 2—热影响区 3—焊缝金属  
 $t$ —试样的厚度 (mm)

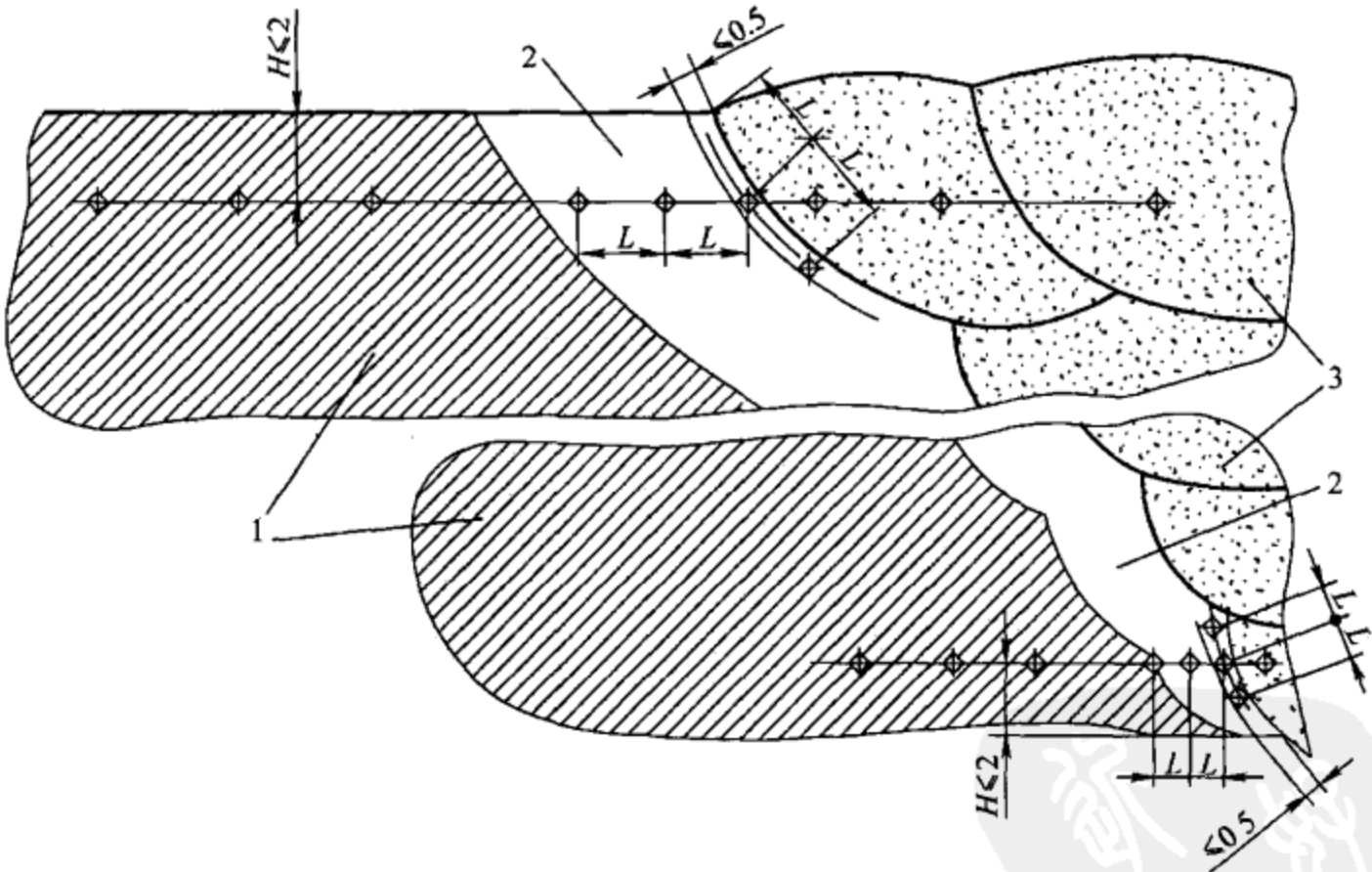


图 3-19 钢根部多道焊焊缝评估硬化程度的测点位置示意图  
1—母材 2—热影响区 3—焊缝金属  
 $H$ —标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离 (mm)  
 $L$ —在热影响区两个相邻测点中心的距离

2) 测点的数量和间距应足以确定由于焊接导致的硬化或软化区域。在热影响区相邻测点中心的距离如表 3-23 所示。

表 3-23 在热影响区两个测点中心之间的距离

硬度符号	两个测点中心间的推荐距离 <sup>①</sup> L/mm	
	钢铁材料 <sup>②</sup>	铝、铜及其合金
HV5	0.7	2.5 ~ 5
HV10	1	3 ~ 5
HBW1/2.5	不使用	2.5 ~ 5
HBW2.5/15.625	不使用	3 ~ 5

① 任何测点中心距已检测点中心的距离应不小于 GB/T 4340.1 允许值。

② 奥氏体钢除外。

3) 在母材上检测时, 应有足够的检测点以保证检测的准确; 在焊缝金属上检测时, 测点间距离的选择应确保对其作出准确评定。

4) 热影响区中由于焊接引起硬化的区域应增加两个测点, 测点中心与熔合线之间的距离小于或等于 0.5mm。

2. 单点测定 (E)

1) 图 3-20 给出了测点位置的典型区域。此外, 还可根据金相检验确定测点位置。

2) 为了防止由测点压痕变形引起的影响, 在任何测点中心间的最小距离不得小于最近测点压痕的对角线或直径的平均值的 2.5 倍。

3) 热影响区中由于焊接引起硬化的区域, 至少应有一个测点, 测点中心与熔合线之间的距离不大于 0.5mm。对于单点测定, 测定区域应按图 3-20 所示予以编号。

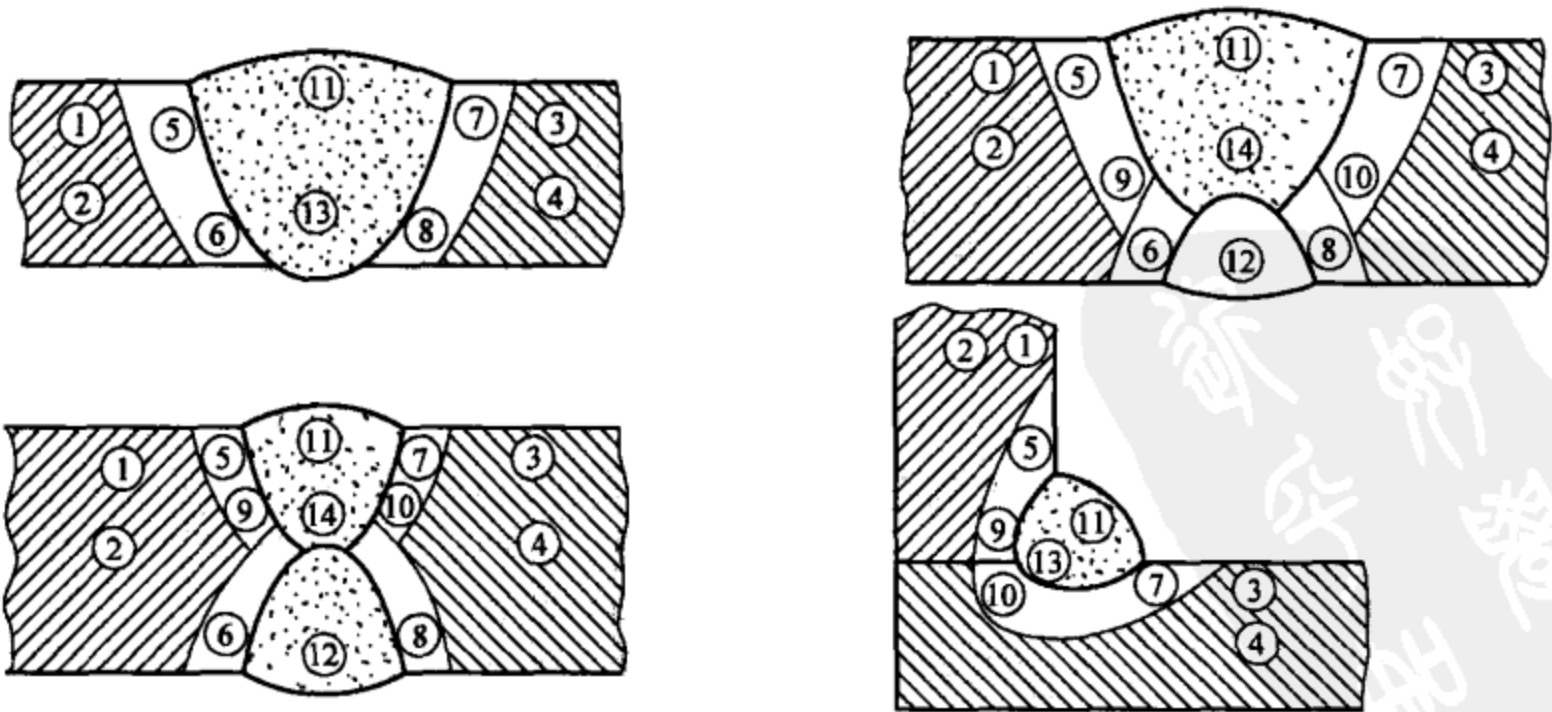


图 3-20 单点测定 (E) 区域示例

1 ~ 4—母材 5 ~ 10—热影响区 11 ~ 14—焊缝金属

### 3.5.8 钢铁热处理零件硬度测试通则

#### 1. 待测试件及测试部位的选取及要求

1) 热处理后有硬度值要求的钢铁零件可全部为待测试件,也可按规定抽样选取一定数量的零件为待测试件。有时采用与零件材料和状态相同的随炉试样来代替待测试件。

2) 批量零件抽样测试硬度时,抽样率与取样方式应保证被选钢铁零件具有代表性。

3) 对于稳定生产的大批量钢铁零件一般可按 GB/T 2828.1—2003《计数抽样检验程序 第1部分:按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划》规定进行抽样检验。

4) 当随炉试样硬度的测试结果不合格时,允许对钢铁零件本体硬度进行复试,并以其结果为判定值。

5) 随炉试样一般不能用于仲裁硬度测试。

6) 为确保测试结果准确,待测试件外观不应存在影响测试结果的污物。

7) 待测试件应有足够的质量、刚度及选用的硬度测试方法所要求的厚度,保证测试过程中不产生振动和发生位移,以确保硬度测试结果的准确。

8) 对于表面硬化层有要求的待测试件,应保证测试结果能正确表征表面硬化层的硬度。

#### 2. 测试面的品质要求

1) 制备测试面过程中,应避免过热或冷作硬化等因素对表面硬度值的影响。

2) 待测试面不应有氧化、脱碳及影响测试结果的污物。

3) 待测试面的表面粗糙度应符合相应硬度测试方法的规定。

4) 待测试面尽可能选择平面,非平面测试面必须符合不同硬度测试方法的相关要求。

#### 3. 试验方法的选择

1) 应按钢铁零件技术要求的不同硬度值选用相应的金属硬度测试方法。目前通用的测试方法有 GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法(A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T标尺)》、GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第1部分:试验方法》、GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》、GB/T 4341—2001《金属肖氏硬度试验方法》、GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》、GB/T 18449.1—2009《金属材料 努氏硬度试验 第1部分:试验方法》等。

2) 冶金和其他设备用辊类件的硬度应按 GB/T 13313—2008《轧辊肖氏、里氏硬度试验方法》进行测试。



3) 生产现场钢铁零件热处理后的硬度可选用里氏硬度计、超声硬度计、锤击式布氏硬度计和携带式布氏硬度计等进行测试。

4) 非平面硬度测试, 应根据不同情况选用不同的硬度计或测试装置。

5) 经不同工艺热处理后的钢铁零件表面硬度测试方法及选用原则如表 3-24 所示, 其心部或基体硬度的测试一般按 GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法 (A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺)》、GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》、GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》、GB/T 4341—2001《金属肖氏硬度试验方法》、GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》进行。

表 3-24 经不同工艺热处理后的钢铁零件表面硬度测试方法及选用原则

热处理件通常类别	表面硬度测试方法标准	选用原则
正火件与退火件	GB/T 230.1、GB/T 231.1、GB/T 4340.1、GB/T 17394	一般按 GB/T 231.1 测试, 或用 GB/T 17394D 型装置测试
淬火件和调质件	GB/T 230.1、GB/T 231.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 13313、GB/T 17394	一般按 GB/T 230.1 (C 标尺) 测试; 辊类件按 GB/T 13313 测试; 调质件按 GB/T 231.1 测试; 小件、薄件按 GB/T 230.1 (A 标尺或 15N 标尺) 或 GB/T 4340.1 测试
表面淬火件	GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 13313、GB/T 17394	一般按 GB/T 230.1 (C 标尺) 测试。硬化层较浅时, 可选用 GB/T 4340.1 或 GB/T 230.1 (15N 或 30N 标尺) 测试。生产现场测试可用 GB/T 17394 中 D 型冲击装置
渗碳件与碳氮共渗件	GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 17394	一般按 GB/T 230.1 测试 (有效硬化层深度大于 0.6mm 时可用 A 标尺或 C 标尺) 硬化层深度较浅 (<0.4mm) 时, 可选用 GB/T 4340.1 或 GB/T 230.1 (15N 或 30N 标尺)
渗氮件	GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 18449.1、GB/T 17394	一般按 GB/T 4340.1 测试 (试验力一般选 98.07N, 如果渗氮层深度 ≤0.2mm 时, 试验力一般不超过 49.03N) 渗氮层深度 >0.3mm 时, 亦可选用 GB/T 230.1 (15N 标尺) 测试, 化合物层硬度按 GB/T 4340.1 (试验力一般 <1.961N)
氮碳共渗件	GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 18449.1、GB/T 17394	一般按 GB/T 4340.1 测试 (试验力一般为 0.4903 ~ 0.9807N); 渗层深度 ≥0.2mm 时可选用 GB/T 17394C 型装置
其他渗非金属件 渗金属件	GB/T 18449.1、GB/T 4340.1、GB/T 17394	

6) 若确定的硬度测试方法有几种试验力可供选择时, 应选用测试条件所允许的最大试验力。

#### 4. 测试部位

1) 测试部位应具有代表性或按照图样规定进行, 钢铁零件的其他部位若能反映工作部位的硬度时也可作为测试部位。

2) 测试部位应具备测试条件, 能够用规定的硬度计方便、快捷、准确地进行

硬度测试。

3) 测试部位磨去层深度不应超过工艺要求所规定的机械加工余量。

4) 选择的测试部位应保证硬度压痕不影响钢铁零件的最终质量。

5) 局部淬火件的淬火区与非淬硬区的交界处、局部化学热处理件的渗层与非渗层交界处、对允许存在的软点或软带的边缘处一般不应作为钢铁零件表面或基体硬度的测试部位。

### 5. 测试点数

1) 对每一待测试件，应按图样要求确定测试点数，每个测试点对应一个硬度测量值。

2) 每一待测试件在正式测试前，一般应先测一个点，以确认工作条件是否正常，该点不记入测试点数。

3) 小尺寸批量零件的测试点数可适当减少，但应适当增加被检测零件数量。

4) 可适当减少大批量同类待测试件的测试点数。

5) 如发现某一测试点的测试结果异常时，允许在该测试点附近补测两次，但原异常测试结果应与补测数值同时记录。

### 6. 测试结果与硬度值的表示

1) 测试结果可能是单一的硬度值，也可能是一个硬度范围，但每一个硬度值均应按不同硬度测试方法的规定来确定。如连续五次有效读数为一个硬度测量值，即为一个硬度值。

2) 在圆柱或球面上测得的硬度值，应按 GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》和 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》的规定进行修正。

3) 硬度值应按 GB/T 8170—2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》进行修约。

4) 记录硬度平均值时，一般应在硬度平均值后面加括号注明计算硬度平均值所用的各测试点硬度值，如 64.0HRC (63.7HRC、64.0HRC、64.3HRC)。

5) 报出换算硬度值时，应在换算值后面加括号注明硬度实测值，如 48.5HRC (75.0HRA)。

## 3.6 各种硬度及强度之间的转换

### 3.6.1 各种硬度间的换算关系

各种硬度间的换算关系如表 3-25 所示。

表 3-25 各种硬度间的换算关系

洛氏硬度 HRC	肖氏硬度 HS	维氏硬度 HV	布氏硬度 HBW	洛氏硬度 HRC	肖氏硬度 HS	维氏硬度 HV	布氏硬度 HBW
70		1037	—	43	57.1	411	401
69		997	—	42	55.9	399	391
68	96.6	959	—	41	54.7	388	380
67	94.6	923	—	40	53.5	377	370
66	92.6	889	—	39	52.3	367	360
65	90.5	856	—	38	51.1	357	350
64	88.4	825	—	37	50	347	341
63	86.5	795	—	36	48.8	338	332
62	84.8	766	—	35	47.8	329	323
61	83.1	739	—	34	46.6	320	314
60	81.4	713	—	33	45.6	312	306
59	79.7	688	—	32	44.5	304	298
58	78.1	664	—	31	43.5	296	291
57	76.5	642	—	30	42.5	289	283
56	74.9	620	—	29	41.6	281	276
55	73.5	599	—	28	40.6	274	269
54	71.9	579	—	27	39.7	268	263
53	70.5	561	—	26	38.8	261	257
52	69.1	543	—	25	37.9	255	251
51	67.7	525	501	24	37	249	245
50	66.3	509	488	23	36.3	243	240
49	65	493	474	22	35.5	237	234
48	63.7	478	461	21	34.7	231	229
47	62.3	463	449	20	34	226	225
46	61	449	436	19	33.2	221	220
45	59.7	436	424	18	32.6	216	216
44	58.4	423	413	17	31.9	211	211

### 3.6.2 钢铁材料硬度与强度的换算关系

钢铁材料硬度与强度的换算关系如表 3-26 所示。

表 3-26 钢铁材料硬度与强度的换算关系

硬 度							抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$								
HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HV	HBW	碳钢	铬钢	铬钒钢	铬镍钢	铬钼钢	铬镍钼钢	铬锰硅钢	超高强度钢	不锈钢
20.0	60.2	68.8	40.7	19.2	226	225	774	742	736	782	747	—	781	—	740
20.5	60.4	69.0	41.2	19.8	228	227	784	751	744	787	753	—	788	—	749
21.0	60.7	69.3	41.7	20.4	230	229	793	760	753	792	760	—	794	—	758
21.5	61.0	69.5	42.2	21.0	233	232	803	769	761	797	767	—	801	—	767
22.0	61.2	69.8	42.6	21.5	235	234	813	779	770	803	774	—	809	—	777
22.5	61.5	70.0	43.1	22.1	238	237	823	788	779	809	781	—	816	—	786
23.0	61.7	70.3	43.6	22.7	241	240	833	798	788	815	789	—	824	—	796
23.5	62.0	70.6	44.0	23.3	244	242	843	808	797	822	797	—	832	—	806
24.0	62.2	70.8	44.5	23.9	247	245	854	818	807	829	805	—	840	—	816
24.5	62.5	71.1	45.0	24.5	250	248	864	828	816	836	813	—	848	—	826
25.0	62.8	71.4	45.5	25.1	253	251	875	838	826	843	822	—	856	—	837
25.5	63.0	71.6	45.9	25.7	256	254	886	848	837	851	831	850	865	—	847
26.0	63.3	71.9	46.4	26.9	259	257	897	859	847	859	840	859	874	—	858
26.5	63.5	72.2	46.9	26.9	262	260	908	870	858	867	850	869	883	—	868
27.0	63.8	72.4	47.3	27.5	266	263	919	880	869	876	860	879	893	—	879
27.5	64.0	72.7	47.8	28.1	269	266	930	891	880	885	870	890	902	—	890
28.0	64.3	73.0	48.3	28.7	273	269	942	902	892	894	880	901	912	—	901
28.5	64.6	73.3	48.7	29.3	276	273	954	914	903	904	891	912	922	—	913
29.0	64.8	73.5	49.2	29.9	280	276	965	925	915	914	902	923	933	—	924
29.5	65.1	73.8	49.7	30.5	284	280	977	937	928	924	913	935	943	—	936
30.0	65.3	74.1	50.2	31.1	288	283	989	948	940	935	924	947	954	—	947
30.5	65.6	74.4	50.6	31.7	292	287	1002	960	953	946	936	959	965	—	959
31.0	65.8	74.7	51.1	32.3	296	291	1014	972	966	957	948	972	977	—	971
31.5	66.1	74.9	51.6	32.9	300	294	1027	984	980	969	961	985	989	—	983
32.0	66.4	75.2	52.0	33.5	304	298	1039	996	993	981	974	999	1001	—	996
32.5	66.6	75.5	52.5	34.1	308	302	1052	1009	1007	994	987	1012	1013	—	1008
33.0	66.9	75.8	53.0	34.7	313	306	1065	1022	1022	1007	1001	1027	1026	—	1021
33.5	67.1	76.1	53.4	35.3	317	310	1078	1034	1036	1020	1015	1041	1039	—	1034
34.0	67.4	76.4	53.9	35.9	321	314	1092	1048	1051	1034	1029	1056	1052	—	1047
34.5	67.7	76.7	54.4	36.5	326	318	1105	1061	1067	1048	1043	1071	1066	—	1060
35.0	67.9	77.0	54.8	37.0	331	323	1119	1074	1082	1063	1058	1087	1079	—	1074
35.5	68.2	77.2	55.3	37.6	335	327	1133	1088	1098	1078	1074	1103	1094	—	1087
36.0	68.4	77.5	55.8	38.2	340	332	1147	1102	1114	1093	1090	1119	1108	—	1101

(续)

硬 度							抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$								
HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HV	HBW	碳钢	铬钢	铬钒钢	铬镍钢	铬钼钢	铬镍钼钢	铬锰硅钢	超高强度钢	不锈钢
36.5	68.7	77.8	56.2	38.8	345	336	1162	1116	1131	1109	1106	1136	1123	—	1116
37.0	69.0	78.1	56.7	39.4	350	341	1177	1131	1148	1125	1122	1153	1139	—	1130
37.5	69.2	78.4	57.2	40.0	355	345	1192	1146	1165	1142	1139	1171	1155	—	1145
38.0	69.5	78.7	57.6	40.6	360	350	1207	1161	1183	1159	1157	1189	1171	—	1161
38.5	69.7	79.0	58.1	41.2	365	355	1222	1176	1201	1177	1174	1207	1187	1170	1176
39.0	70.0	79.3	58.6	41.8	371	360	1238	1192	1219	1195	1192	1226	1204	1195	1193
39.5	70.3	79.6	59.0	42.4	376	365	1254	1208	1238	1214	1211	1245	1222	1219	1209
40.0	70.5	79.9	59.5	43.0	381	370	1271	1225	1257	1233	1230	1265	1240	1243	1226
40.5	70.8	80.2	60.0	43.6	387	375	1288	1242	1276	1252	1249	1285	1258	1267	1244
41.0	71.1	80.5	60.4	44.2	393	380	1305	1260	1296	1273	1269	1306	1277	1290	1262
41.5	71.3	80.8	60.9	44.8	398	385	1322	1278	1317	1293	1289	1327	1296	1313	1280
42.0	71.6	81.1	61.3	45.4	404	391	1340	1296	1337	1314	1310	1348	1316	1336	1299
42.5	71.8	81.4	61.8	45.9	410	397	1359	1315	1358	1336	1331	1370	1336	1359	1319
43.0	72.1	81.7	62.3	46.5	416	403	1378	1335	1380	1358	1353	1392	1357	1381	1339
43.5	72.4	82.0	62.7	47.1	422	409	1397	1355	1401	1380	1375	1415	1378	1404	1361
44.0	72.6	82.3	63.2	47.7	428	415	1417	1376	1424	1404	1397	1439	1400	1427	1383
44.5	72.9	82.6	63.6	48.3	435	422	1438	1398	1446	1427	1420	1462	1422	1450	1405
45.0	73.2	82.9	64.1	48.9	441	428	1459	1420	1469	1451	1444	1487	1445	1473	1429
45.5	73.4	83.2	64.6	49.5	448	435	1481	1444	1493	1476	1468	1512	1469	1496	1453
46.0	73.7	83.5	65.0	50.1	454	441	1503	1468	1517	1502	1492	1537	1493	1520	1479
46.5	73.9	83.7	65.5	50.7	461	448	1526	1493	1541	1527	1517	1563	1517	1544	1505
47.0	74.2	84.0	65.9	51.2	468	455	1550	1519	1566	1554	1542	1589	1543	1569	1533
47.5	74.5	84.3	66.4	51.8	475	463	1575	1546	1591	1581	1568	1616	1569	1594	1562
48.0	74.7	84.6	66.8	52.4	482	470	1600	1574	1617	1608	1595	1643	1595	1620	1592
48.5	75.0	84.9	67.3	53.0	489	478	1626	1603	1643	1636	1622	1671	1623	1646	1623
49.0	75.3	85.2	67.7	53.6	497	486	1653	1633	1670	1665	1649	1699	1651	1674	1655
49.5	75.5	85.5	68.2	54.2	504	494	1681	1665	1697	1695	1677	1728	1679	1702	1689
50.0	75.8	85.7	68.6	54.7	512	502	1710	1698	1724	1724	1706	1758	1709	1731	1725
50.5	76.1	86.0	69.1	55.3	520	510	—	1732	1752	1755	1735	1788	1739	1761	—
51.0	76.3	86.3	69.5	55.9	527	518	—	1768	1780	1786	1764	1819	1770	1792	—
51.5	76.6	86.6	70.0	56.5	535	527	—	1806	1809	1818	1794	1850	1801	1824	—
52.0	76.9	86.8	70.4	57.1	544	535	—	1845	1839	1850	1825	1881	1834	1857	—
52.5	77.1	87.1	70.9	57.6	552	544	—	—	1869	1883	1856	1914	1867	1892	—

(续)

[illegible]



### 3.6.3 有色金属材料硬度与强度的换算关系

有色金属材料硬度 (HBW) 与抗拉强度  $R_m$  ( $N/mm^2$ ) 的关系可按关系式  $R_m = KHBW$  计算, 其中强度-硬度系数  $K$  值按表 3-27 取值。

表 3-27 有色金属材料强度-硬度系数  $K$  值

材 料	$K$ 值	材 料	$K$ 值
铝	2.7	铝黄铜	4.8
铅	2.9	铸铝 ZL103	2.12
锡	2.9	铸铝 ZL101	2.66
铜	5.5	硬铝	3.6
单相黄铜	3.5	锌合金铸件	0.9
H62	4.3 ~ 4.6		



## 第4章 金属材料的冲击性能

### 4.1 冲击性能相关知识

#### 4.1.1 冲击性能及冲击试验的定义

材料抵抗冲击载荷的能力称为材料的冲击性能。冲击载荷是指以较高的速度施加到零件上的载荷，当零件在承受冲击载荷时，瞬间冲击所引起的应力和变形比静载荷时要大得多。因此，在制造承受冲击载荷的零件时，就必须考虑到材料的冲击性能。

冲击试验是利用能量守恒原理，将具有一定形状和尺寸的带有V形或U形缺口的试样，在冲击载荷作用下冲断，以测定其吸收能量的一种试验方法。冲击试验是试样在冲击试验力的作用下的一种动态力学性能试验。冲击试验对材料的缺陷很敏感，它能灵敏地反映出材料的宏观缺陷、显微组织的微小变化和材料质量，因此冲击试验是生产上用来检验冶炼、热加工、热处理工艺质量的有效方法。

#### 4.1.2 冲击试验常用术语

(1) 夏比冲击试验 夏比冲击试验是用规定高度的摆锤对处于简支梁状态的缺口试样进行一次性冲击，并测量试样折断时的吸收能量的试验。夏比冲击试样有U形缺口试样和V形缺口两种试样。V形缺口由于应力集中较大，应力分布对缺口附近体积塑性变形的限制较大而使塑性变形更难进行。V形缺口参与塑性变形的体积较小，冲击时消耗的冲击功较小，且脆性转变温度较高和范围较窄，对温脆性转变反应更灵敏，断口也较清晰，更容易反映金属阻止裂纹扩展的抗力。

(2) 实际初始势能 ( $K_p$ ) 对试验机直接检验测定的值。

(3) 吸收能量 ( $K$ ) 在冲击试验中，由指针或其他指示装置示出的能量值。用字母V和U表示缺口几何形状，用下标数字2或8表示摆锤刀刃半径，例如KV<sub>2</sub>。在旧标准中，经常用冲击吸收功  $A_K$  (规定形状和尺寸的试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功) 和冲击韧度  $\alpha_K$  (冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功) 来表示材料的冲击性能。冲击性能名称、符号新旧标准对照如表4-1所示。

表 4-1 冲击性能名称、符号新旧标准对照

试 样	旧 标 准		新 标 准
	冲击韧度	冲击吸收功	吸收能量
无缺口试样	$a_K$	$A_K$	$K$
U 形试样	$a_{KU}$	$A_{KU}$	$KU_2、KU_8$
V 形试样	$a_{KV}$	$A_{KV}$	$KV_2、KV_8$

(4) 试样高度 ( $h$ ) 试样开缺口面与其相对面之间的距离, 如图 4-1 所示。

(5) 试样宽度 ( $w$ ) 试样与缺口轴线平行且垂直于高度方向的尺寸, 如图 4-1 所示。

(6) 长度 ( $L$ ) 试样与缺口方向垂直的最大尺寸, 缺口方向即缺口深度方向, 如图 4-1 所示。

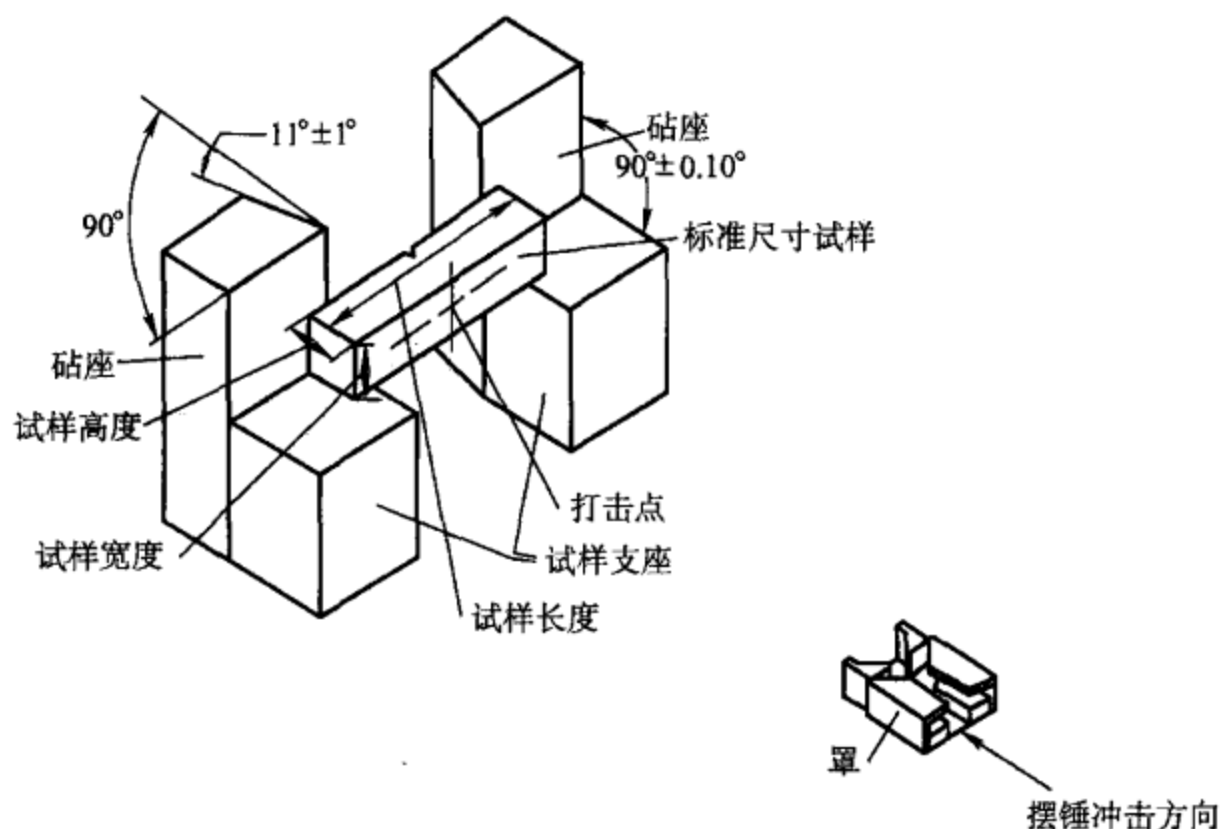


图 4-1 试样与摆锤冲击试验机支座及砧座相对位置

(7) 仪器化冲击试验 仪器化冲击试验是在冲击试验机上装有力传感器和位移传感器, 可以显示和记录冲击过程各种参量的一种试验。冲击试验时的冲击功通常由裂纹形成功和裂纹扩展功两部分组成, 将这两部分功分别进行记录和分析可以更好地评定金属的脆断倾向。夏比 V 形缺口冲击试样在疲劳试验机上预制成全深为 5mm 的疲劳裂纹, 然后在装有自动记录装置的夏比冲击试验机上进行冲击试验。冲击摆锤上贴有电阻应变片可以传感冲击过程中力的变化, 其输出由计算机观测和记录而得到冲击过程中的力-时间曲线; 再通过各种测量位移的装置求出冲击过程中位移与时间的关系, 由此求出位移-时间曲线, 从而可求得动态开裂发生的动态

断裂韧度  $K_{ID}$ 。

(8) 屈服力 ( $F_{gy}$ ) 力-位移曲线从直线上升部分向曲线上升部分增加转变点时的力。它表征穿过试样全部不带裂纹试样的韧带发生屈服时的近似值, 实质上是试样缺口根部发生屈服时相应的冲击力。

(9) 最大力 ( $F_m$ ) 力-位移 (或力-时间) 曲线上力的最大值。

(10) 不稳定裂纹扩展起始力 ( $F_{iu}$ ) 力-位移 (或力-时间) 曲线急剧下降开始时的力。表示不稳定扩展开始时的特征。

(11) 不稳定裂纹扩展终止力 ( $F_a$ ) 力-位移 (或力-时间) 曲线急剧下降终止时的力。

(12) 屈服位移 ( $s_{gy}$ ) 与屈服力相对应的位移。

(13) 最大力时的位移 ( $s_m$ ) 与最大力相对应的位移。

(14) 不稳定裂纹扩展起始位移 ( $s_{iu}$ ) 不稳定裂纹扩展开始时的位移。

(15) 不稳定裂纹扩展终止位移 ( $s_a$ ) 不稳定裂纹扩展终止时的位移。

(16) 总位移 ( $s_t$ ) 力-位移曲线结束时的位移。

(17) 最大力时的能量 ( $W_m$ ) 力-位移曲线下从  $s=0$  到  $s=s_m$  部分的面积。

(18) 不稳定裂纹扩展起始能量 ( $W_{iu}$ ) 力-位移曲线下从  $s=0$  到  $s=s_{iu}$  部分的面积。

(19) 不稳定裂纹扩展终止能量 ( $W_a$ ) 力-位移曲线下从  $s=0$  到  $s=s_a$  部分的面积。

(20) 裂纹形成能量 ( $W_i$ ) 近似认为, 力-位移曲线下从  $s=0$  到  $s=s_m$  部分的面积, 即  $W_i \approx W_m$ 。

(21) 裂纹扩展能量 ( $W_p$ ) 力-位移曲线下从  $s=s_m$  到  $s=s_t$  的面积, 即  $W_p = W_t - W_i$ 。

(22) 总冲击能量 ( $W_t$ ) 力-位移曲线下从  $s=0$  到  $s=s_t$  的面积。

(23) 冲击试样断口 冲击试样冲断后的断裂表面及临近表面的区域。其宏观外貌一般呈晶状, 纤维状 (含剪切唇) 或混合状。

(24) 晶状断面 断裂表面一般呈现金属光泽的晶状颗粒, 无明显塑性变形的齐平断面。

(25) 晶状断面率 断口中晶状区的总面积与缺口下方原始横截面积的百分比。

(26) 纤维状断面 断裂表面一般呈现无金属光泽的纤维形貌, 有明显塑性变形的断面。

(27) 纤维断面率 断口中纤维区的总面积与缺口下方原始横截面积的百分比。

(28) 侧膨胀值 断裂试样缺口侧面每侧宽度较大增加量之和。

## 4.2 冲击试样的制备

### 4.2.1 试样的一般要求

在冲击试样上制造缺口的目的是，使材料内部各种微小的变化敏感地反映在冲击韧性方面。缺口试样在承受冲击力后会在缺口附近产生应力集中和应变集中，改变了缺口前后的应力分布，形成三向不等应力状态，在此状态下塑性变形受到不同程度约束，因而缺口促进了材料的脆化。即使试验材料相同，但缺口类型不同时，由于应力状态不同，得到的吸收能量也不相同。缺口形状及尺寸有三个参数：缺口根部曲率半径、缺口深度和缺口角度，这三个参数决定着缺口附近的应力集中程度，从而影响该试样的吸收能量，试验前后应检查这几个尺寸参数。夏比 V 形缺口冲击试样使用的非常广泛，主要用于韧性较好的材料，例如低碳钢、低合金钢、有色金属等试验，通常低温试验和评定转变温度的系列冲击试验采用 V 形缺口试样。夏比 U 形缺口冲击试样使用不多，由于缺口根部曲率半径较大，应力状态对塑性变形的约束较 V 形缺口小，主要用于韧性较低的材料。

1) 无论哪种试样，当坯料粗加工后，均需在平面磨床上磨削加工，再开缺口。对硬度较低的材料（如退火钢）采用铣、刨、钻等方法开缺口，对硬度较高的钢材，则需要用砂轮磨削，保证缺口根部处没有影响吸收能的加工痕迹。冲击试样上的缺口的加工要求非常严格，因缺口尖端半径较小，稍有偏差对结果影响很大。为了试验结果的分散性，也可用淬硬钢制成与缺口形状相同的刀刃压入试样制成缺口。

2) 试样表面粗糙度  $Ra$  应小于  $5\mu\text{m}$ ，端部除外。缺口底部质量也很重要，缺口底部应光滑，不应出现与缺口轴线平行的加工痕迹和划痕。对于重要的试验或仲裁试验，缺口底部表面粗糙度值  $Ra$  不大于  $1.6\mu\text{m}$ 。

3) 为避免混淆，试验前应对试样进行适当的标记，但标记的位置不应影响试样的支承和定位，并且应尽量远离缺口。不应标在与支座、砧座或摆锤刀刃接触的面上，试样标记应避免塑性变形和表面不连续性对冲击吸收能量的影响。

4) 对于需热处理的试验材料，应在最后精加工前进行热处理。试样制备过程应将由于过热或冷加工硬化而改变材料冲击性能的影响减至最小。

### 4.2.2 夏比 V 形缺口试样

夏比 V 形缺口试样的形状和尺寸按图 4-2 和表 4-2 确定。

表 4-2 夏比冲击试样的尺寸及偏差

名 称		符号及序号	V 形缺口试样		U 形缺口试样	
			公称尺寸	机加工偏差	公称尺寸	机加工偏差
长度/mm		$l$	55	$\pm 0.60$	55	$\pm 0.60$
高度/mm		$h$	10	$\pm 0.075$	10	$\pm 0.11$
宽度/mm	标准试样	$w$	10	$\pm 0.11$	10	$\pm 0.11$
	小试样		7.5	$\pm 0.11$	7.5	$\pm 0.11$
			5	$\pm 0.06$	5	$\pm 0.06$
			2.5	$\pm 0.04$	—	—
缺口角度/(°)		1	45	$\pm 2$	—	—
缺口底部高度/mm		2	8	$\pm 0.075$	8 <sup>①</sup>	$\pm 0.09$
					5	$\pm 0.09$
缺口根部半径/mm		3	0.25	$\pm 0.025$	1	$\pm 0.07$
缺口对称面-端部距离/mm		4	27.5	$\pm 0.42$ <sup>②</sup>	27.5	$\pm 0.42$ <sup>②</sup>
缺口对称面-试样纵轴角度/(°)		—	90	$\pm 2$	90	$\pm 2$
试样纵向面间夹角/(°)		5	90	$\pm 2$	90	$\pm 2$

注：除端部外，试样表面粗糙度  $Ra$  应小于  $5\mu\text{m}$ 。  
① 如规定其他高度，应规定相应偏差。  
② 对自动定位试样的试验机，建议偏差用  $\pm 0.165\text{mm}$  代替  $\pm 0.42\text{mm}$ 。

4.2.3 夏比 U 形缺口试样

夏比 U 形缺口试样的形状和尺寸按图 4-3 和表 4-2 确定。

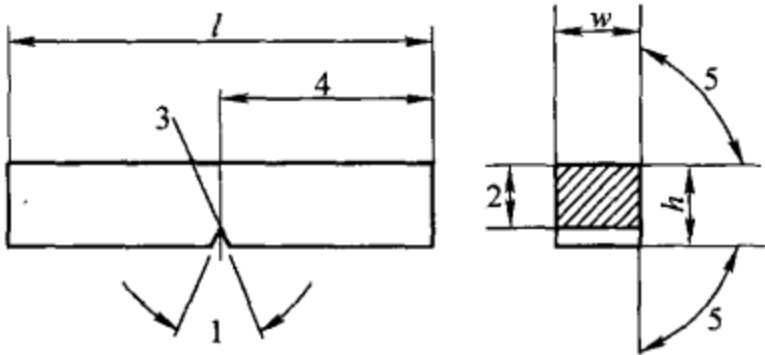


图 4-2 V 形缺口试样

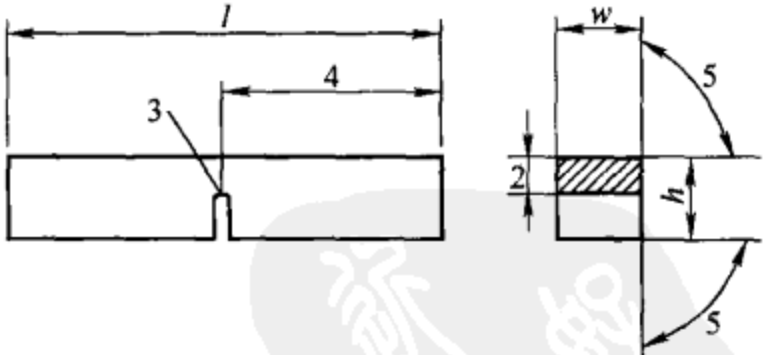


图 4-3 U 形缺口试样

4.2.4 非标准试样

如果当试验材料的厚度在 10mm 以下而不能制备标准试样，可采用宽度 7.5mm、5mm 或 2.5mm 的小尺寸试样。试样的其他尺寸及公差与相应缺口的标准试样相同，缺口应开在试样的窄面上。



### 4.2.5 焊接接头冲击试验用试样

焊接接头冲击试验用试样应从焊接接头上截取，试样的纵轴与焊缝长度方向垂直。试样的性质一般用符号表示，符号中的字母说明试样类型、位置和缺口方向，而数字表明缺口距参考线和焊缝表面的距离。符号由下列字母组成：

- 1) 第一个字母：U 为夏比 U 形缺口，V 为夏比 V 形缺口。
- 2) 第二个字母：W 为缺口在焊缝，H 为缺口在热影响区。
- 3) 第三个字母：S 为缺口面平行于焊缝表面，T 为缺口面垂直于焊缝表面。
- 4) 第四个字母： $a$  为缺口中心线距参考线的距离（如果缺口中心线与参考线重合，则记录  $a=0$ ）。
- 5) 第五个字母： $b$  为试样表面距焊缝表面的距离（如果试样表面在焊缝表面，则记录  $b=0$ ）。

焊接接头冲击试验试样的表示方法如表 4-3 和表 4-4 所示，典型符号示例如图 4-4 所示，表中 RL 实际上是参考线。缺口在焊缝时，RL 为试样上焊缝中心；缺口在热影响区，RL 为试样上熔合线或压焊接头的结合线。

表 4-3 S 位 置

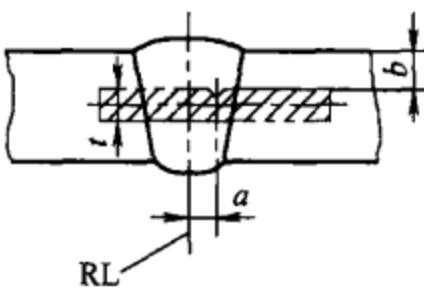
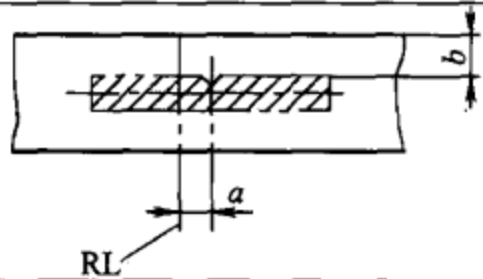
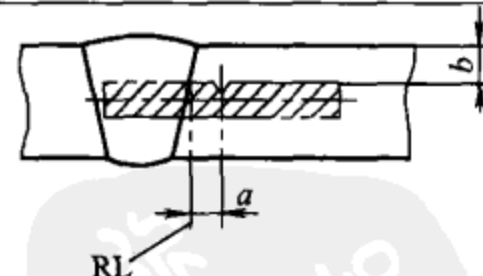
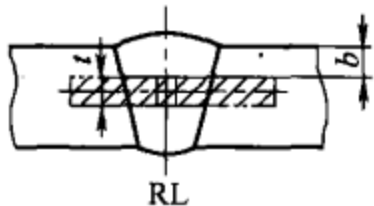
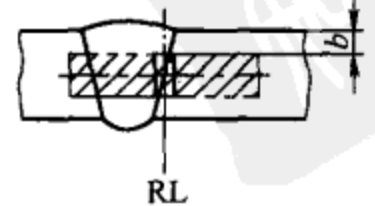
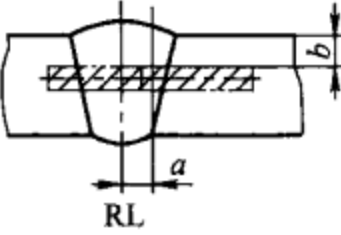
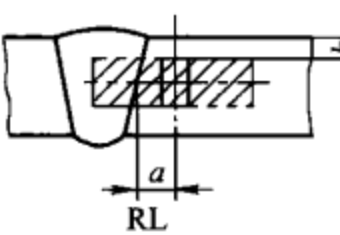
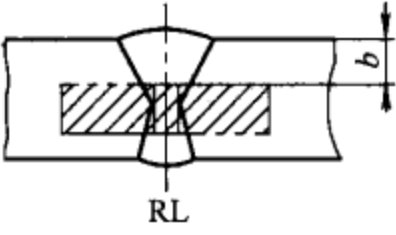
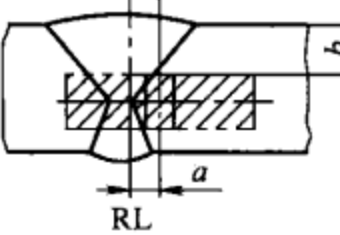
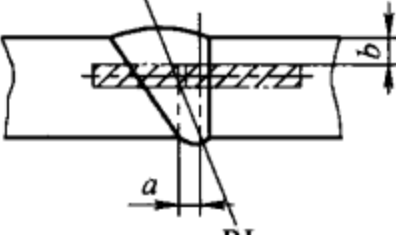
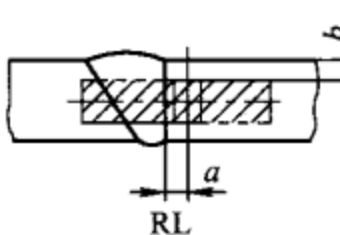
符号	缺口在焊缝	符 号	缺口在热影响区
	示意图		示意图
VWS $a/b$		VHS $a/b$ (压焊)	
		VHS $a/b$ (熔化焊)	

表 4-4 T 位 置

符 号	缺口在热影响区	符号	缺口在热影响区
	示意图		示意图
VWT 0/ $b$		VHT 0/ $b$	

(续)

符 号	缺口在焊缝	符号	缺口在热影响区
	示意图		示意图
VWT $a/b$		VHT $a/b$	
VWT 0/b		VHT $a/b$	
VWT $a/b$		VHT $a/b$	

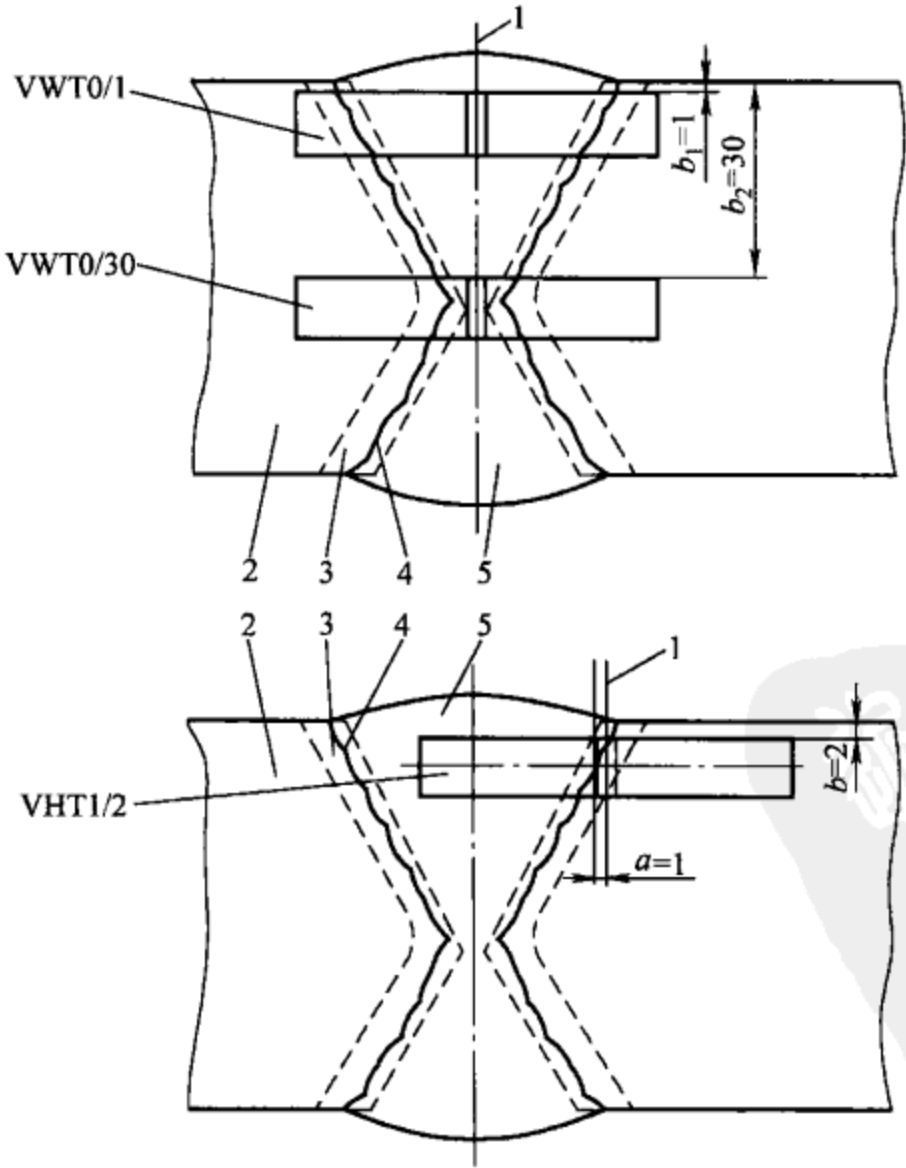


图4-4 典型符号示例

1—缺口轴线 2—母材 3—热影响区 4—熔合线 5—焊缝金属

## 4.3 冲击试验机

### 4.3.1 摆锤冲击试验机

摆锤冲击试验机分为简支梁冲击试验机、悬臂梁冲击试验机、拉伸冲击试验机等类型，主要用于工程塑料、玻璃钢、陶瓷、增强尼龙、电绝缘材料等非金属材料的抗冲击能力的测定。摆锤冲击试验机有指针式和电子式两种类型。其中，电子式冲击试验机采用液晶显示，微型打印机输出试验结果，并具有能量损失自动修正功能。

摆锤冲击试验机主要由五部分组成，包括基础、机架、摆锤、砧座和支座、指示装置，如图 4-5 所示。

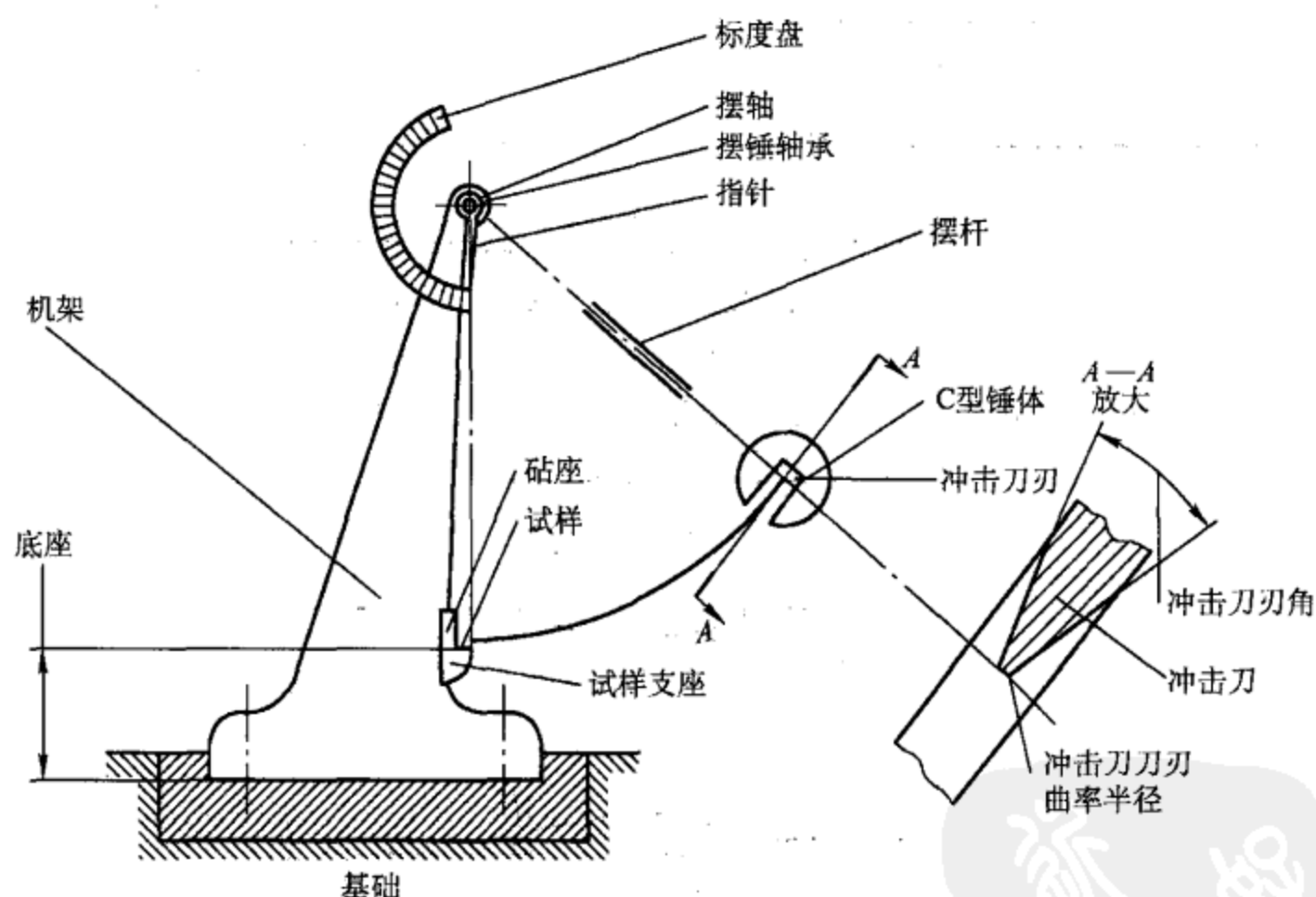


图 4-5 摆锤冲击试验机的组成部分

### 4.3.2 低温冲击试验机

低温冲击试验机的结构，包括冲击试验机、低温炉及电器控制操纵部分。

(1) 冲击试验机 与室温冲击试验机相比，它除了底座、机身、摆锤及表盘，外加了保护罩。低温冲击试验时，试样靠机械自动送到支座上。

(2) 低温炉 低温炉能够冷却试样到所要求的试验温度，并能保持这一温度。炉体通常用不锈钢制造，内外层之间用绝热材料分开，炉膛内有装冲击试样的匣子。当试样温度降到试验温度时，应保持足够时间，使试样表面温度与心部温度一致。温度的控制与保持均在操作台上进行。

(3) 保温 试样应在规定温度下保持一段时间。当使用液体介质时，保温时间不少于 5min；使用气体介质时，保温时间不少于 20min。

(4) 冷源 低温冲击试验试样冷却装置使用的冷源，最常用的是干冰（固体二氧化碳）和液氮，它们无毒性、安全、对金属不起侵蚀作用。用酒精作为介质，干冰为冷源，可以获得  $-70^{\circ}\text{C}$  以上的温度；用液氮作冷源，可获得从  $-90 \sim 0^{\circ}\text{C}$  的低温。当试验温度在  $-90 \sim -70^{\circ}\text{C}$  之间时，一般使用液氮作为冷源。

(5) 低温环境的产生和控制 对液氮瓶内的电阻丝加热，使液氮蒸发产生一定压力，从而使液氮沿管路压进低温炉内，降低试样温度。当达到试验温度后，控制部分使加热电阻丝停止加热，液氮输送终止，以达到保温目的。在没有低温冲击机设备时，使用常温冲击机也可进行低温冲击试验，可采用低温容器，对试样降温，如图 4-6 所示。低温容器内放冷却介质，一般为酒精或甲醇，用干冰或液氮作冷源。由于低于室温的试样置于室温下温度会逐步回升，因而试样实际温度会高于在低温容器中的试样温度，为了减少送样时温度升高的影响，可采取对试样冷却时有一定过冷度的方法，以补偿送样过程中温度升高的影响。

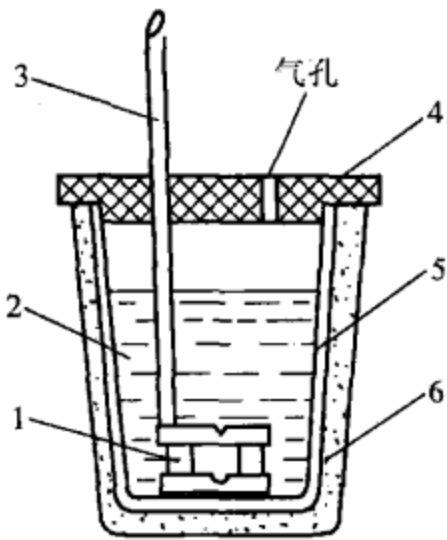


图 4-6 放试样的低温容器

1—冲击试样 2—冷却介质 3—温度计  
4—软木塞 5—玻璃杯 6—泡沫塑料

(6) 时间 试样从液体介质中移出至打击的时间应在 2s 之内，试样离开气体介质装置打击的时间应在 1s 之内。如不能满足上述要求，则必须在 3 ~ 5s 内打断试样，此时应采用过冷试样的方法补偿温度损失。过冷温度如表 4-5 所示。

(7) 其他要求 为使试样冷却温度均匀一致，低温容器应具有足够容量，并能对低温容器内的冷却介质进行均匀搅拌。测温用热电偶偏差应不大于  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。测温辅助仪器（如自动指示装置或电位差计），误差应不超过  $\pm 0.1\%$ 。试样保温期间，温度控制装置应能将试验温度稳定在规定值的  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  之内。

表 4-5 低温冲击试验的过冷温度

(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

试 验 温 度	过 冷 温 度
$-192 \sim -100$	3 ~ 4
$-100 \sim -60$	2 ~ 3
$-60 \sim 0$	1 ~ 2

### 4.3.3 高温冲击试验机

高温冲击试验过程中的取样、高温送样、冲击、制动均为自动化控制。高温炉加热器可分为二段或三段炉丝绕制，分别控制加热炉工作段的温度和梯度。控制温度组件可采用铂电阻，或者直接由热电偶的指示温度进行监测。如果没有专用的高温冲击机，也可用小型箱式炉加热试样，在一般的冲击机上进行高温冲击。但应该注意从炉内取出试样的转移时间间隔，一般试样从液体介质中移出至打击时间在2s之内，试样离开气体介质装置至打击的时间应在1s之内。若在3~5s内打断试样，此时应根据试验时环境温度及试验温度的高低确定一定的过热温度，以补偿取样转移过程中试样温度的降低。试样在不同试验温度下的过热温度如表4-6所示。试样加热到规定温度并保温20min后即可进行试验。

表 4-6 高温冲击试验过热温度 (单位:℃)

试验温度	过热温度	试验温度	过热温度
35 ~ 200	1 ~ 5	600 ~ 700	20 ~ 25
200 ~ 400	5 ~ 10	700 ~ 800	25 ~ 30
400 ~ 500	10 ~ 15	800 ~ 900	30 ~ 40
500 ~ 600	15 ~ 20	900 ~ 1000	40 ~ 50

## 4.4 试验要求

### 4.4.1 一般要求

试样应紧贴试验机砧座，锤刃沿缺口对称面打击试样缺口的背面，试样缺口对称面偏离两砧座间的中点应不大于0.5mm。试验前，应检查摆锤空打时的回零差或空载能耗。

### 4.4.2 试验温度

1) 对于试验温度有规定的，应在规定温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内进行；如果没有规定，室温冲击试验应在 $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 范围内进行。

2) 当使用液体介质冷却试样时，试样应放置于一容器中的网栅上，网栅至少高于容器底部25mm，液体浸过试样的高度至少25mm，试样距容器侧壁至少10mm，并应连续均匀搅拌介质，使其温度均匀。

3) 测定介质温度的仪器应置于一组试样中间处，介质温度应在规定温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内，保持至少5min。当使用气体介质冷却试样时，试样距低温装置内表

面，以及试样与试样之间应保持足够的距离，试样应在规定温度下保持至少 20min。

4) 对于试验温度不超过 200℃ 的高温试验，试样应在规定温度  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  的液池中保持至少 10min；对于试验温度超过 200℃ 的试验，试样应在规定温度  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  以内的高温装置内保持至少 20min。

4.4.3 试样的转移

1) 当试验不在室温进行时，试样从高温或低温装置中移出至打断的时间应不大于 5s。移取试样时，夹具的温度应与介质温度相同。

2) 转移装置的设计和使用应能使试样温度保持在允许的温度范围内。转移装置与试样接触部分应与试样一起加热或冷却。

3) 确保试样对中装置不引起低能量高强度试样断裂后回弹到摆锤上而引起不正确的能量偏高指示。现已表明，试样端部和对中装置的间隙或定位部件的间隙应大于 13mm；否则，在断裂过程中，试样端部可能回弹至摆锤上。

4) V 形缺口自动对中夹钳一般用于将试样从控温介质中移至适当的试验位置。此类夹钳消除了由于断样和固定的对中装置之间相互影响带来的潜在间隙问题。对中夹钳的形状如图 4-7 所示。V 形缺口夏比冲击试样尺寸如表 4-7 所示。

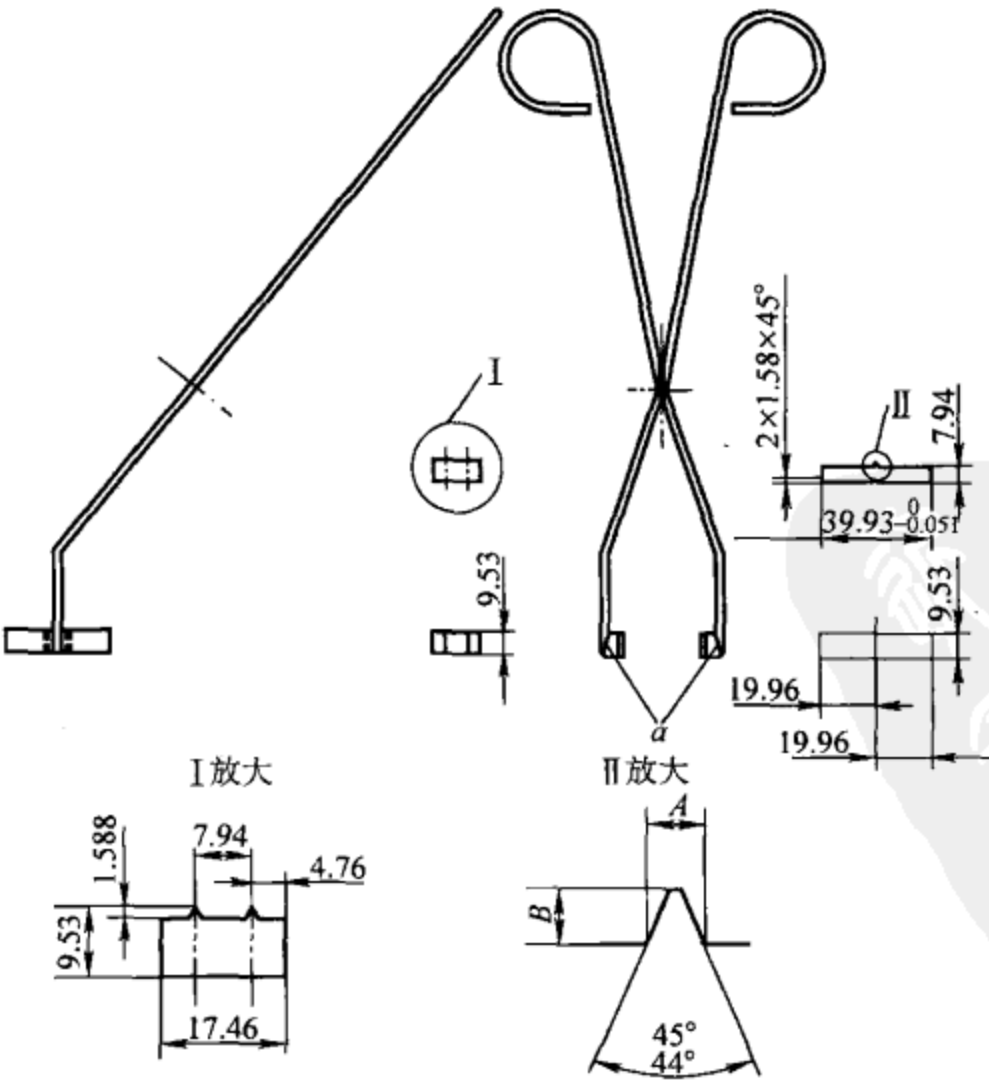


图 4-7 V 形缺口夏比冲击试样对中夹钳



表 4-7 V 形缺口夏比冲击试样尺寸

(单位: mm)

试样宽度	缺口宽度 $A$	高度 $B$
10	1.60 ~ 1.70	1.52 ~ 1.65
5	0.74 ~ 0.80	0.69 ~ 0.81
3	0.45 ~ 0.51	0.36 ~ 0.48

## 4.5 冲击性能的测定

### 4.5.1 夏比摆锤冲击法

#### 1. 试验程序

- 1) 试验前, 检查试验设备和仪器, 检查摆锤空打时指针是否指零, 其偏离不应超过最小分长值的  $1/4$ 。
- 2) 加热或冷却试样达到规定温度并保温。
- 3) 试样对中定位, 偏差不大于  $0.5\text{mm}$ 。试样应紧贴支座放置, 并使摆锤刀刃打击在背向缺口的一面。
- 4) 释放摆锤一次打击试样, 记录吸收能量。
- 5) 每种条件下的冲击试验应不少于 3 个试样。

#### 2. 试验操作要点

- 1) 试样吸收能量  $K$  不应超过实际初始势能  $K_p$  的 80%。如果试样吸收能超过此值, 在试验报告中应报告为近似值, 并注明超过试验机能力的 80%。一般试样吸收能量  $K$  的下限应不低于试验机最小分辨力的 25 倍。
- 2) 冲击速度一般为  $3 \sim 6\text{m/s}$ 。
- 3) 对于试验后没有完全断裂的试样, 可以报出冲击吸收能量, 或与完全断裂试样结果平均后报出。由于试验机打击能量不足, 试样未完全断开, 吸收能量不能确定, 试验报告应注明, 试样未断开。
- 4) 如果试样卡在试验机上, 试验结果无效。
- 5) 读取每个试样的冲击吸收能量, 应至少估读到或 0.5 个标度单位。

### 4.5.2 夏比 V 形缺口摆锤冲击试验仪器化法

#### 1. 试验原理

通过摆锤一次打断不同工件或不同温度下测出的力-位移曲线, 即使力-位移曲线下的面积或吸收能量相同, 如果力-位移曲线的形状和特征值有所不同, 那么试样变形及断裂性质也不同。以此可以推断出试样变形和断裂的特性。

## 2. 力-位移曲线的评定

1) 必须考虑叠加在力-位移信号上的振荡, 如图 4-8 所示, 通过振荡曲线的拟合再现屈服力等特征值。

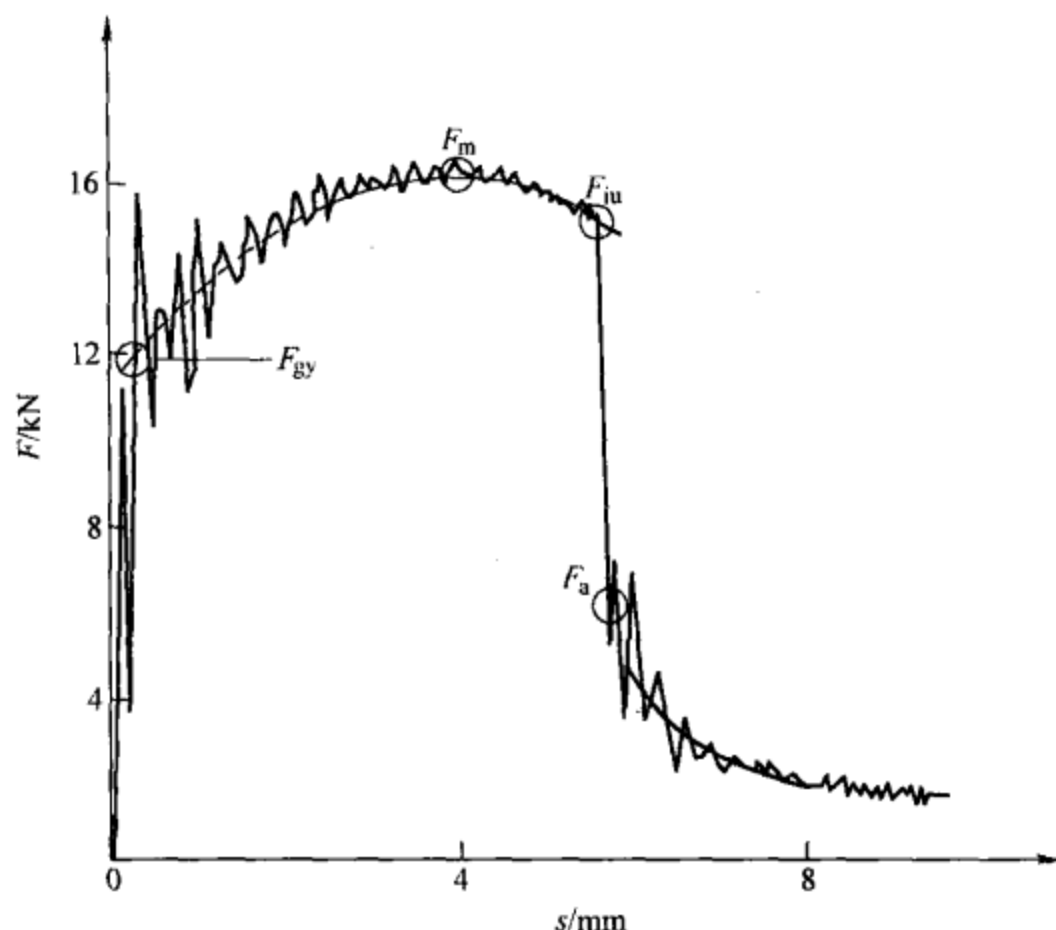


图 4-8 力特征值的确定

2) 按冲击曲线近似关系将力-位移曲线分为 A、B、C、D、E、F 六种类型, 如表 4-8 所示。在最大力前不存在屈服 (即几乎不存在塑性变形), 且只产生不稳定裂纹扩展的为 A 型; 在最大力前不存在屈服力, 但有少量稳定裂纹扩展的为 B 型; 在最大力前存在塑性变形, 并有稳定和 unstable 裂纹扩展, 根据其稳定或不稳定裂纹扩展所占比例的大小分为 C、D、E 型; 只产生稳定裂纹扩展的为 F 型。这六种曲线类型中, A 与 B 型为脆性断裂, 两者之差别在于 B 型曲线形状有少量的稳定扩展; F 型为韧性断裂, 它只产生稳定扩展; C、D 和 E 型为半韧性断裂, 它们既存在稳定扩展又有不稳定扩展, 但各种曲线形状中稳定的和不稳定的扩展所占比例不同。

## 3. 力特征值的确定

1) 力-位移 (或力-时间) 曲线上第二个峰急剧上升部分与拟合曲线的交点对应的力即为屈服力。

2) 穿过振荡曲线的拟合曲线上最大值所对应的力即为最大力。

3) 拟合曲线与力-位移曲线在最大力之后曲线急剧下降开始时的交点对应的力, 即为不稳定裂纹扩展起始力。

4) 力-位移曲线急剧下降终止时与其后的力-位移拟合曲线的交点对应的力,

即为不稳定裂纹扩展终止力。

表 4-8 力-位移特征曲线的分类

类型	示意图	实际曲线	类型	示意图	实际曲线
A			D		
B			E		
C			F		

#### 4. 位移特征值的确定

按确定的力特征值所对应的横坐标确定位移特征值，当力-位移曲线与横坐标不相交时，用  $F = 0.02F_m$  所对应的横坐标作为终点来计算总位移。

#### 5. 冲击能量特征值的确定

- 1) 力-位移曲线下从  $s = 0$  到  $s = s_m$  的面积即为最大力时的能量。
- 2) 力-位移曲线下从  $s = 0$  到  $s = s_{iu}$  的面积即为不稳定裂纹扩展起始能量。
- 3) 力-位移曲线下从  $s = 0$  到  $s = s_a$  的面积即为不稳定裂纹扩展终止能量。
- 4) 力-位移曲线下从  $s = 0$  到  $s = s_t$  的面积即为总冲击能量。

## 4.6 冲击断口的测定

### 4.6.1 纤维断面率的测定

#### 1. 对比法

将冲击试样断口与冲击试样断口纤维断面率示意图（见图4-9）进行比较，估算出纤维断面率。

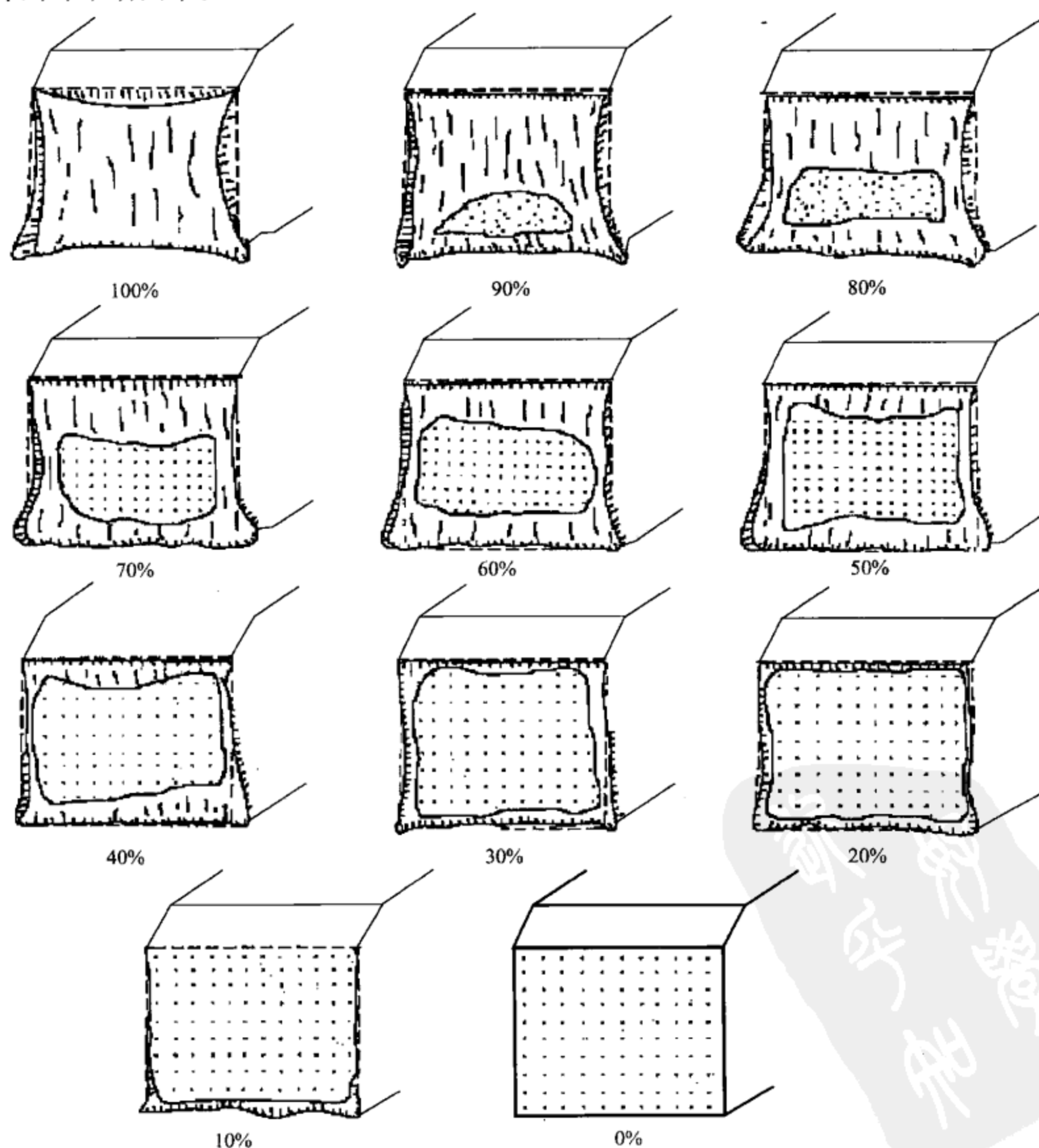


图4-9 冲击试样断口纤维断面率示意图

## 2. 游标卡尺测定法

1) 按断口上晶状区的形状, 若能归类成矩形、梯形时 (见图 4-10), 可用游标卡尺测出相应尺寸, 直接查表 4-9 得到纤维断面率。

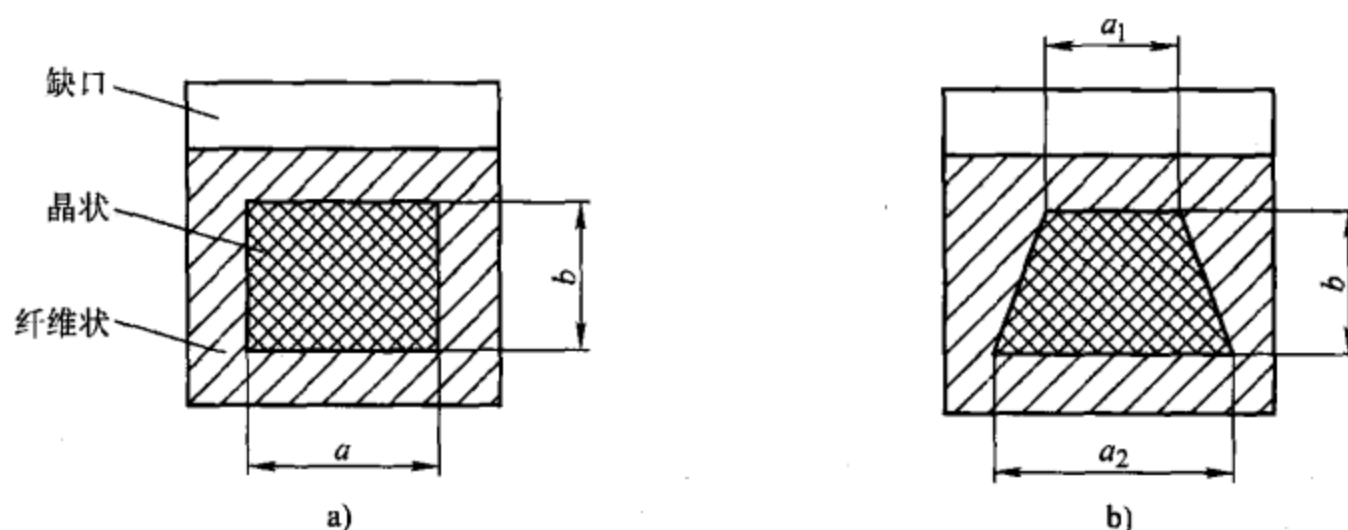


图 4-10 游标卡尺测定法示意图

a) 矩形中测  $a$ 、 $b$  的值 b) 梯形中测  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b$  的值

表 4-9 纤维断面率

b/mm	a/mm																			
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	
	纤维断面率(%)																			
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88	
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	81	83	82	81	
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	78	76	75	
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69	
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	78	76	74	72	70	68	66	64	62	
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56	
4.0	95	92	90	88	85	82	80	78	75	72	70	68	65	62	60	58	55	52	50	
4.5	94	92	89	86	83	80	78	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	47	44	
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	38	
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31	
6.0	92	89	85	81	78	74	70	66	62	59	55	51	48	44	40	36	32	29	25	
6.5	92	88	84	80	76	72	68	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19	
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	48	43	39	34	30	26	21	17	12	
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6	
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	

2) 若断口上晶状部分形状不规则时, 可划分成若干个正方形、平行四边形、三角形或梯形等, 再测量相应尺寸, 计算其总面积, 然后用下式算出晶状断面率:

$$CA = \frac{S_c}{S_0} \times 100\% \quad (4-1)$$

式中  $CA$ ——晶状断面率(%) ;

$S_c$ ——断口中晶状区的总面积, 单位为  $\text{mm}^2$  ;

$S_0$ ——原始横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$  。

按下式计算纤维断面率:

$$FA = \frac{S_0 - S_c}{S_0} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中  $FA$ ——纤维断面率(%) ;

$S_c$ ——断口中晶状区的总面积, 单位为  $\text{mm}^2$  ;

$S_0$ ——原始横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$  。

### 3. 卡片测定法

用透明塑料薄膜制成  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的方孔卡片或网格卡片, 如图 4-11 所示, 测量晶状区面积, 用式 (4-1) 或式 (4-2) 分别算出晶状断面率或纤维断面率。

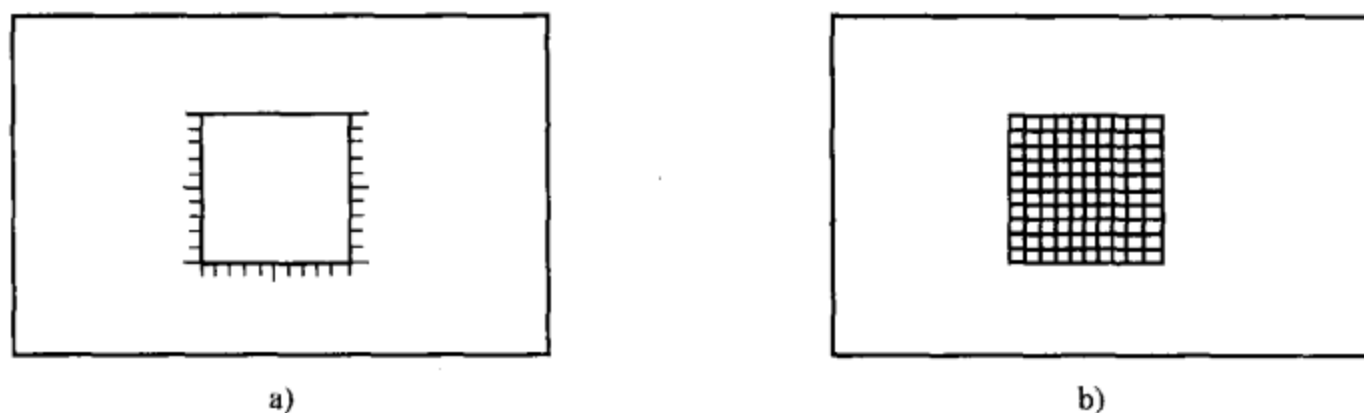


图 4-11 测量晶状面积用卡片

a) 方孔卡片 b) 网格卡片

## 4.6.2 侧膨胀值的测定

### 1. 侧膨胀仪测定法

1) 校正侧膨胀仪零位。

2) 先取一截试样, 把被测面紧贴在基准座上, 侧膨胀部位的最高点顶在百分表砧面上, 记下读数。取另一截试样, 在同一侧重复上述步骤, 所测量两个值中的较大者即为试样该侧的膨胀量。

3) 重复 2) 中的操作, 测出该试样另一侧的膨胀值。



4) 两侧的膨胀量之和, 即为该试样的侧膨胀值  $C_p$ 。

## 2. 游标卡尺测定法

1) 测量试样原始宽度  $W_0$ 。

2) 把冲断的两截试样的缺口背面相重合, 并使侧面位于同一平面上, 如图 4-12 所示。

3) 压紧两截试样, 使游标卡尺的测量面平行于试样的侧面, 测量断口侧向膨胀最高点间的距离  $W_1$ 。

4) 若断裂的两截试样连在一起, 可直接用游标卡尺测量  $W_1$ 。

5) 所测两数值之差  $C_p = W_1 - W_0$ , 即为该试样的侧膨胀值。

## 3. 投影仪测定法

1) 取一截试样, 使其缺口朝下, 放在光学投影仪的移动平台上。以试样原始宽度的一个棱边对准投影仪屏幕上的基准线, 记录横向测微头上的读数  $b_0$ 。再旋转横向测微头, 使基准线对准试样侧向膨胀部位的最高点, 调整焦距, 记录读数  $b_1$ 。计算两个数值之差  $(b_0 - b_1)$  的绝对值。取另一截试样, 对同侧重复上述步骤。两个差值绝对值中的较大者即为试样该侧的膨胀量。

2) 重复上述步骤, 测出该试样另一侧的膨胀量。

3) 两侧的膨胀量之和, 即为该试样的侧膨胀值  $C_p$ 。

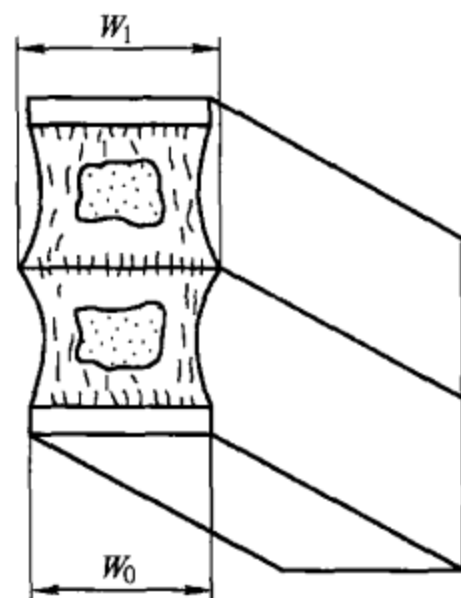


图 4-12 侧膨胀值的测定

## 第5章 金属材料的扭转性能

### 5.1 扭转性能相关知识

#### 5.1.1 扭转性能及扭转试验的定义

材料抵抗扭矩作用的性能称为扭转性能。

扭转试验是测试材料在切应力作用下力学性能的试验技术，它可以测定脆性材料和塑性材料的强度和塑性。对于制造承受扭矩的零件（如轴、弹簧等材料）常需进行扭转试验。扭转试验在扭转试验机上进行，试验时在圆柱形试样的标距两端施加扭矩，测量扭矩及其相应的扭角，一般扭至断裂，便可测出金属材料的各项扭转性能指标。这些指标对于承受剪切扭转的机械零件具有重要实际意义。

#### 5.1.2 扭转试验常用术语

- (1) 标距 ( $L_0$ ) 试样上用以测量扭角的两标记间距离的长度。
- (2) 扭转计标距 ( $L_e$ ) 用扭转计测量试样扭角所使用试样平行部分的长度。
- (3) 最大扭矩 ( $T_m$ ) 试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大扭矩，对于无明显屈服（或连续屈服）的金属材料，为试验期间的最大扭矩。
- (4) 剪切模量 ( $G$ ) 切应力与切应变成线性比例关系范围内切应力与切应变之比。
- (5) 规定非比例扭转强度 ( $\tau_p$ ) 扭转试验中，试样标距部分外表面上的非比例切应变达到规定数值时的切应力。表示此应力的符号应附以下标说明，例如， $\tau_{p0.3}$ 表示规定的非比例切应变达到0.3%的切应力。
- (6) 屈服强度 当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性发生而扭矩不增加的应力点，应区分上屈服强度和下屈服强度。
- (7) 上屈服强度 ( $\tau_{eH}$ ) 扭转试验中，试样发生屈服而扭矩首次下降前的最高切应力。
- (8) 下屈服强度 ( $\tau_{eL}$ ) 扭转试验中，在屈服期间不计初始瞬时效应的最低切应力。
- (9) 抗扭强度 ( $\tau_m$ ) 相应最大扭矩的切应力。
- (10) 最大非比例切应变 ( $\gamma_{max}$ ) 试样扭断时其外表面上的最大非比例切应变。

(11) 单向扭转 试样绕自身轴线向一个方向均匀旋转  $360^\circ$  作为一次扭转至规定次数或试样断裂。

(12) 双向扭转 试样绕自身轴线向一个方向均匀旋转  $360^\circ$  作为一次扭转至规定次数后，向相反方向旋转相同次数或试样断裂。

## 5.2 扭转试样的制备

### 5.2.1 圆柱形试样

圆柱形试样的形状和尺寸如图 5-1 所示。试样头部形状和尺寸应适应试验机夹头夹持。一般采用直径为 10mm、标距分别为 50mm 和 100mm、平行长度分别为 70mm 和 120mm 的试样。若采用其他直径的试样，其平行长度应为标距加上两倍直径。

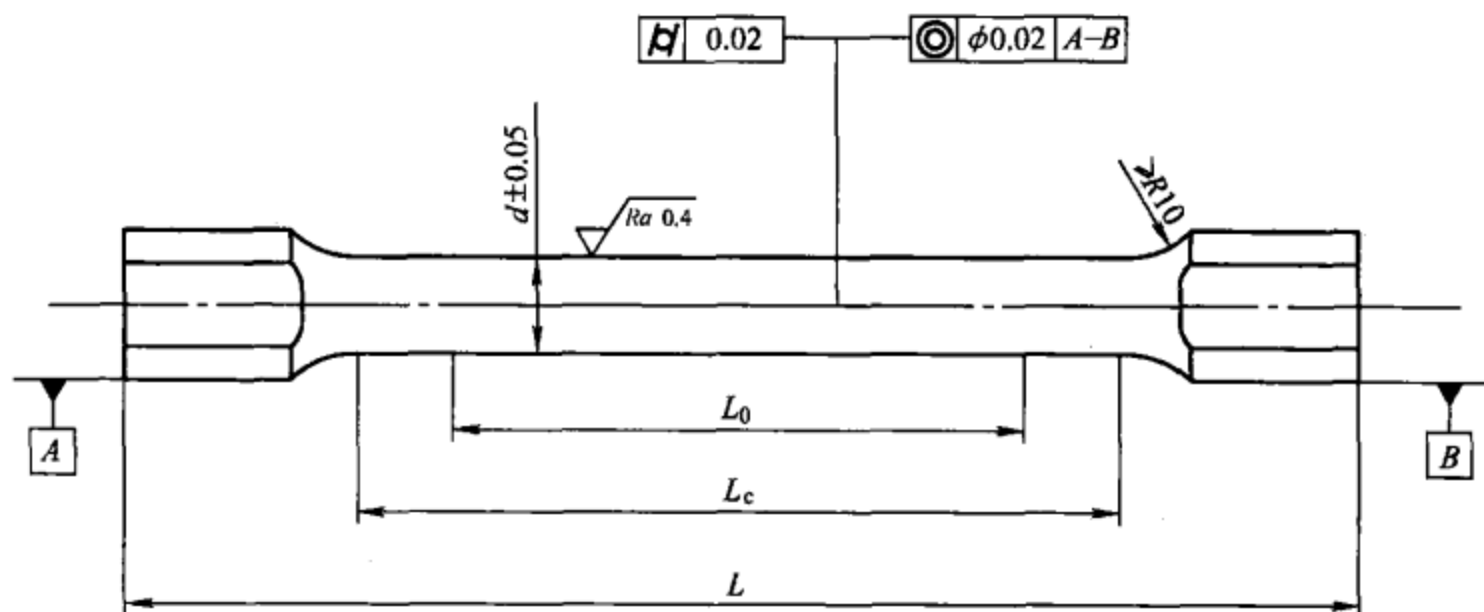


图 5-1 圆柱形试样

$L_0$ —试样标距  $L_c$ —试样平行长度  $L$ —试样总长度

### 5.2.2 管形试样

管形试样的平行长度应为标距加上两倍外直径，其外直径和管壁厚度的尺寸公差及内外表面粗糙度应符合相关规定。试样应平直，两端应配合塞头，塞头不应伸进其平行长度内。管形试样塞头的形状和尺寸如图 5-2 所示。

### 5.2.3 小规格金属线材扭转试样

所谓小规格线材，是指测定直径（或特征尺寸）为 0.3 ~ 10mm 的金属线材。

1) 试样应尽可能是平直的，试样头部

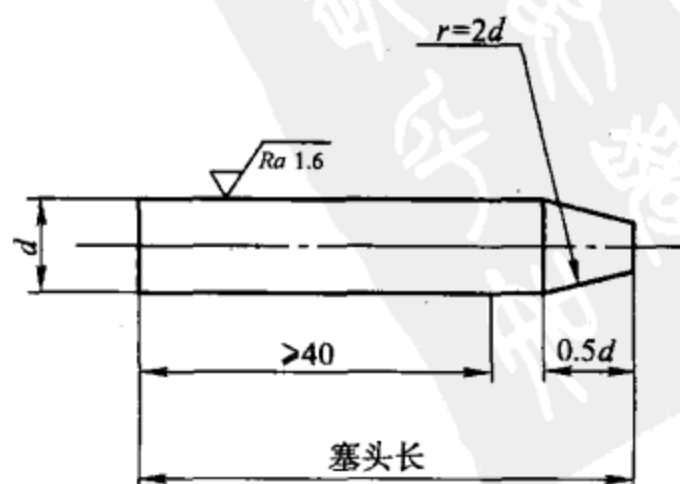


图 5-2 管形试样塞头

夹持部位应平整，方便夹具的夹持。

- 2) 可将试样置于木材、塑料或铜质平面上，用由这些材料制成的工具矫直。
- 3) 矫直时不允许损伤试样表面，不应扭曲试样，也不允许对试样进行任何热加工处理。
- 4) 存在局部硬弯的线材不允许用于试验。
- 5) 金属线材扭转试样形状和尺寸如图 5-3 所示。

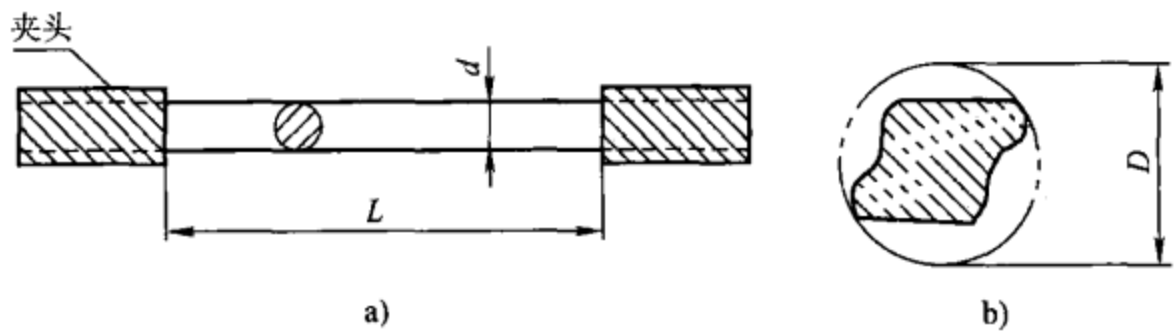


图 5-3 金属线材扭转试样

a) 圆形横截面 b) 非圆形横截面

$d$ —圆形横截面金属线材直径  $D$ —非圆形横截面金属线材特征尺寸  
 $L$ —两夹头之间的标距长度

- 6) 试样间两夹头间的标距长度如表 5-1 所示。

表 5-1 小规格金属线材扭转试样的标距 (单位: mm)

线材公称直径 $d$ 或特征尺寸 $D$	两夹头间标距长度
0.3 ~ <1.0	$200d(D)$
1.0 ~ <5.0	$100d(D)$
5.0 ~ <10.0	$50d(D)$

5.2.4 大规格金属线材扭转试样

所谓大规格线材，是指测定直径（或特征尺寸）大于 10mm 的金属线材。

- 1) 试样应符合 5.2.3 中小规格线材的 1) ~5) 的要求。
- 2) 试样形状如图 5-3 所示。
- 3) 试样间两夹头间的标距长度  $L$  应为  $22d$  或  $22D$ 。

5.2.5 试样尺寸的测量

1. 测量装置

测量试样尺寸的装置应定期进行校准，其分辨力如表 5-2 所示。

2. 圆柱形试样的测量

圆柱形试样应在标距两端及中间处两个相互垂直的方向上各测一次直径，并取其算术平均值。用 3 处测得直径的算术平均值计算试样的极惯性矩，用 3 处测得的算术平均值中的最小值计算试样的截面系数。

表 5-2 测量装置的分辨力

(单位: mm)

试样尺寸		测量装置分辨力
直径		0.01
壁厚	<1	0.002
	≥1	0.01
标距		0.05

### 3. 管形试样的测量

管形试样应在其一端两个相互垂直的方向上各测一次外径, 取其算术平均值。在同一端两个相互垂直的方向上测量四处管壁厚度, 取其算术平均值。用测得的平均外径和平均管壁厚度计算管形试样的极惯性矩和截面系数。

## 5.3 扭转试验机和扭转计

### 5.3.1 扭转试验机

#### 1. 试验机的要求

- 1) 试验机两夹头之一应能沿轴向自由移动, 对试样无附加轴向力, 两夹头保持同轴。
- 2) 试验机应能对试样连续施加扭矩, 无冲击和振动。
- 3) 试验机应具有良好的读数稳定性, 在 30s 内保持扭矩恒定。
- 4) 试验机夹头应有适合的硬度, 不同硬度材质的试样应使用合适硬度的夹块进行试验。一般夹头的硬度高于试样硬度 20HRC 左右。
- 5) 试验机的速度应能调节, 并有自动记录扭转次数的装置及测量两夹头间标距长度的刻度尺。

#### 2. 试验机的操作要点

(1) 量程选择 根据试样平行长度部分的横截面积和材料的抗扭强度, 估计测试所需施加的最大扭矩, 尽可能使其处于选定量程的 40% ~ 80% 范围内。

(2) 安装试样 根据试样的尺寸选择夹块和衬套, 并塞放在试验机的两夹头中。先将试样插入固定夹头, 再将主动夹头旋转到适当位置, 移动溜板对准试样装入夹头, 用内六角扳手拧紧夹头侧面的压紧螺钉, 使夹块压紧试样。

(3) 检查绘图机构 检查记录笔是否有墨水, 观察笔尖划线是否流畅。注意记录纸走动是否正常。调整记录筒的转速, 以便获得合适的走纸速度。

(4) 调零计数 在施加扭矩之前, 测扭矩度盘的主动指针应指在零位, 同时调整附在主动夹头上的扭转角刻度环, 使其零点与指针重合。

(5) 调整转速 扭转速度的选择应符合试验要求。一般脆性材料和塑性材料在屈服前，均应以低速施加扭矩；塑性材料屈服后，可以提高扭转速度。

5.3.2 扭转计

- 1) 扭转计标距相对误差应不大于  $\pm 0.5\%$ ，并能牢固地装卡在试样上，试验过程中不发生滑移。
- 2) 扭角示值分辨力不大于  $0.001^\circ$ 。
- 3) 扭角示值相对误差为  $\pm 1.0\%$ （在不大于  $0.5^\circ$  范围时，示值误差不大于  $0.005^\circ$ ）。
- 4) 扭角示值重复性不大于  $1.0\%$ 。

5.4 试验要求

- 1) 试验一般在  $10 \sim 35^\circ\text{C}$  范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 2) 屈服前的扭转速度应在  $1/120 \sim 1/12\text{r/min}$  范围内，屈服后的扭转速度应不大于  $2\text{r/min}$ ，速度的改变不能有冲击。
- 3) 直径或特征尺寸为  $0.3 \sim 10.0\text{mm}$  的金属线材的单向或双向扭转次数如表 5-3 所示。

表 5-3 直径或特征尺寸为  $0.3 \sim 10.0\text{mm}$  的金属线材的单向或双向扭转次数

线材公称直径 $d$ 或特征尺寸 $D$ /mm	单向扭转次数/(r/min)			双向扭转次数 /(r/min)
	钢	铜及铜合金	铝及铝合金	
<1.0	180	300	60	60
1.0 ~ <1.5	60	120		
1.5 ~ <3.0		90		
3.0 ~ <3.6		60		
3.6 ~ <5.0	30	30	60	30
5.0 ~ 10.0				

- 4) 直径或特征尺寸大于  $10.0\text{mm}$  的金属线材的单向或双向扭转次数为  $2 \sim 6\text{r/min}$ 。

5.5 扭转性能的测定

5.5.1 试验原理

扭转试验时，在试样两端缓慢地施加扭转力矩。从试验开始直至破断，试样工



作长度上塑性变形都是均匀的。横截面上经受切应力，试样表面的应力状态如图 5-4 所示。

当最大切应力大于材料的抗剪强度时，材料呈切断，断面垂直于试样轴线。当最大正应力大于材料的抗拉强度时，材料呈正断，断面和试样轴线呈  $45^\circ$  角。因此，扭转试验可明显地区分材料是正断还是切断的断裂方式。在扭转试验过程中，试样横截面沿直径方向的切应力和切应变是不均匀的，如图 5-5 所示，试样表面所受的切应力和切应变最大。扭转的断裂源首先产生于试样表面，故扭转试验可灵敏地显示金属表面的缺陷。

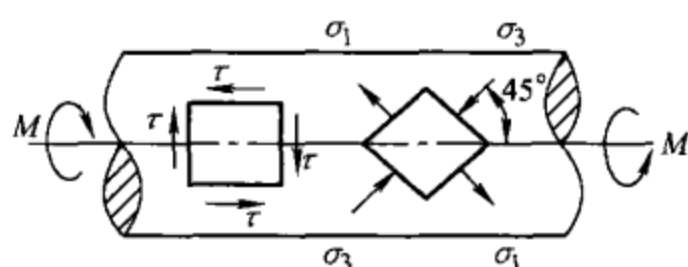


图 5-4 扭转度试样表面应力状态

$\sigma$ —正应力  $\tau$ —切应力  $M$ —扭矩

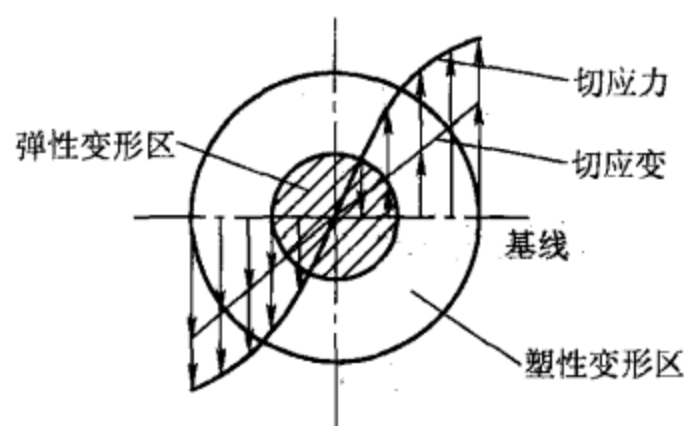


图 5-5 扭转试样断面应力和应变分布

## 5.5.2 剪切模量的测定

### 1. 图解法

- 1) 用自动记录方法记录扭矩-扭角 ( $T-\phi$ ) 曲线。
- 2) 在所记录曲线的弹性直线段上，读取扭矩增量 ( $\Delta T$ ) 和相应的扭角增量 ( $\Delta\phi$ )，如图 5-6 所示。
- 3) 按下式计算剪切模量：

$$G = \frac{\Delta T L_e}{\Delta\phi I_p} \quad (5-1)$$

式中  $G$ ——剪切模量，单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ；  
 $\Delta T$ ——扭矩增量，单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ；  
 $L_e$ ——扭转计标距，单位为  $\text{mm}$ ；  
 $\Delta\phi$ ——扭角增量，单位为  $(^\circ)$ ；  
 $I_p$ ——极惯性矩，单位为  $\text{mm}^4$ ，对于圆柱形试样和管形试样分别按下式计算：

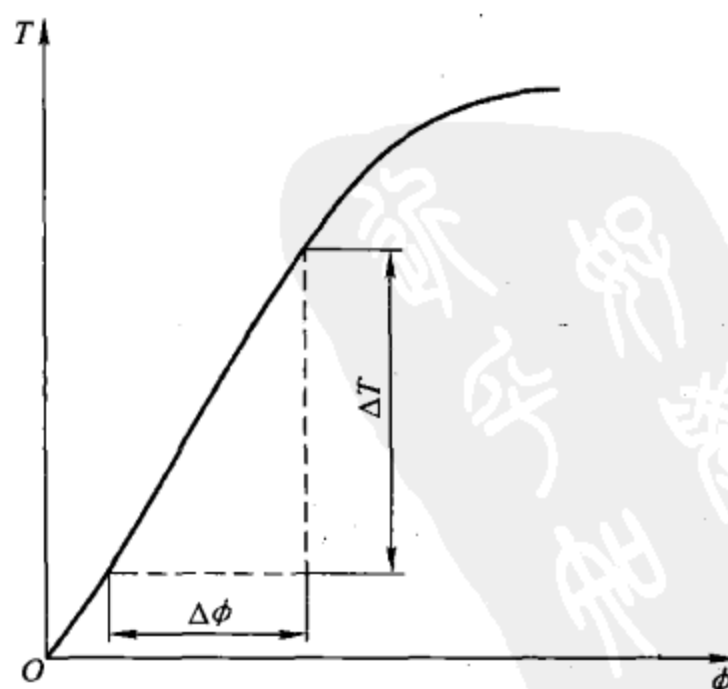


图 5-6 剪切模量

圆柱形试样

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

式中  $d$ ——圆柱形试样平行长度部分的外直径, 单位为 mm。

管形试样

$$I_p = \frac{\pi d^3 a}{4} \left[ 1 - \frac{3a}{d} + \frac{4a^2}{d^2} - \frac{2a^3}{d^3} \right]$$

式中  $d$ ——管形试样平行长度部分的外直径, 单位为 mm;

$a$ ——管形试样平行长度部分的管壁厚度, 单位为 mm。

## 2. 逐吸加载法

- 1) 对试样施加预扭矩, 预扭矩一般不超过相应预期规定非比例扭转强度  $\tau_{p0.015}$  的 10%。
- 2) 装上扭转计并调整零点。
- 3) 在弹性直线段范围内, 用不少于 5 级等扭矩对试样加载。
- 4) 记录每级扭矩和相应的扭角, 读取每对数据对的时间不超过 10s。
- 5) 计算出平均每级扭角增量。
- 6) 按式 (5-1) 计算剪切模量。

## 5.5.3 规定非比例扭转强度的测定

### 1. 图解法

- 1) 用自动记录方法记录扭矩-扭角 ( $T-\phi$ ) 曲线, 如图 5-7 所示。
- 2) 在所记录的曲线上延长弹性直线段交扭角轴于  $O$  点, 截取  $OC = 2L_e \gamma_p / d$ , 过点  $C$  作弹性直线段的平行线  $CA$  交曲线于  $A$ , 点  $A$  对应的扭矩为所求扭矩  $T_p$ 。
- 3) 按下式计算规定非比例扭转强度:

$$\tau_p = \frac{T_p}{W} \quad (5-2)$$

式中  $\tau_p$ ——规定非比例扭转强度, 单位为  $N/mm^2$ ;

$T_p$ ——规定非比例扭矩, 单位为  $N \cdot mm$ ;

$W$ ——截面系数, 单位为  $mm^3$ , 对于圆柱形试样和管形试样分别按下式计算:

圆柱形试样  $W = \frac{\pi d^3}{16}$

式中  $d$ ——圆柱形试样平行长度部分的外直径, 单位为 mm。

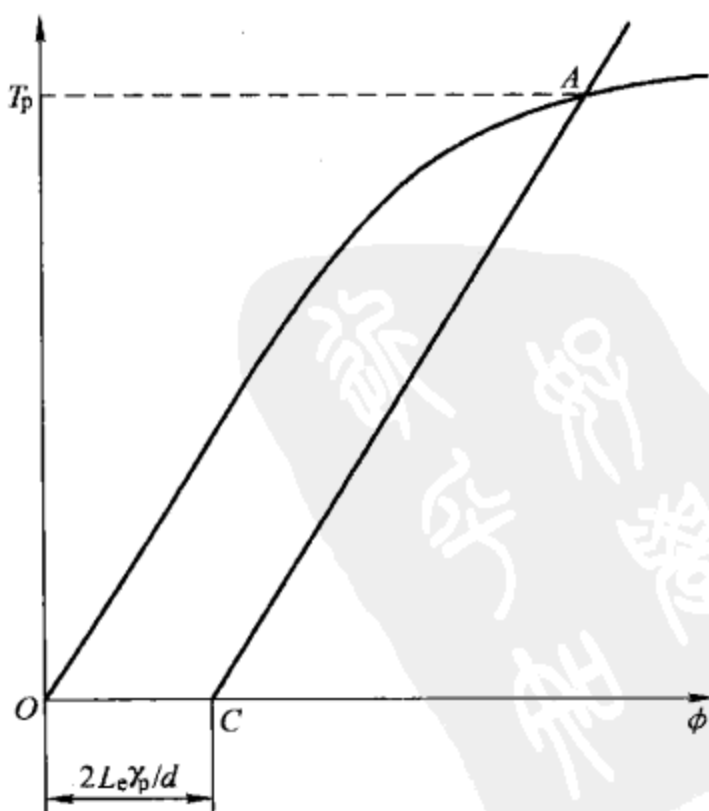


图 5-7 规定非比例扭转强度

管形试样

$$W = \frac{\pi d^2 a}{2} \left[ 1 - \frac{3a}{d} + \frac{4a^2}{d^2} - \frac{2a^3}{d^3} \right]$$

式中  $d$ ——管形试样平行长度部分的外直径, 单位为 mm;

$a$ ——管形试样平行长度部分的管壁厚度, 单位为 mm。

## 2. 逐级加载法

1) 对试样施加预扭矩, 预扭矩一般不超过相应预期规定非比例扭转强度  $\tau_{p0.015}$  的 10%。

2) 装上扭转计并调整零点。

3) 在相当于规定非比例扭转强度  $\tau_{p0.015}$  的 70% ~ 80% 以前, 施加大等级扭矩, 以后施加小等级扭矩, 小等级扭矩应相当于不大于  $10\text{N/mm}^2$  的切应力增量。

4) 读取各级扭矩读数中减去计算得到的弹性部分扭角, 得到非比例部分扭角。

5) 施加扭矩直至得到非比例扭角等于或稍大于所规定的数值为止。

6) 用内插法求出精确的扭矩, 按式 (5-2) 计算规定非比例扭转强度。

## 3. 逐级加载法测定规定非比例扭转强度举例

试验材料为碳素钢, 试样直径  $d$  为  $\phi 10.00\text{mm}$ ; 扭转计标距  $L_e = 100.0\text{mm}$ , 扭转计分度  $0.00025\text{rad}$ , 截面系数  $W = 196.35\text{mm}^3$ 。

预期规定非比例扭转强度  $\tau_{p0.015} = 250\text{N/mm}^2$ , 取初始预应力  $\tau_0 = 10\% \tau_{p0.015} = 25\text{N/mm}^2$ , 相当于预扭矩  $T_0 = \tau_0 \times W = 4908.75\text{N} \cdot \text{mm}$ , 取整  $T_0 = 5000\text{N} \cdot \text{mm}$ 。相当于预期规定非比例扭转强度的 80% 的扭矩为

$$T = 80\% \tau_{p0.015} W = 0.8 \times 250 \times 196.35\text{N} \cdot \text{mm} = 39270\text{N} \cdot \text{mm}, \text{取整 } T = 39000\text{N} \cdot \text{mm}$$

在预期规定非比例扭转强度的 80% 以前施加大等级扭矩, 以后施加小等级扭矩。大等级扭矩取 3 级, 每级为

$$\Delta T = \frac{T - T_0}{3} = \frac{39000 - 5000}{3}\text{N} \cdot \text{mm} = 11333\text{N} \cdot \text{mm}$$

取整  $\Delta T = 11000\text{N} \cdot \text{mm}$ 。

小等级扭矩取  $\Delta T_1 = 2000\text{N} \cdot \text{mm}$ 。

试验记录如表 5-4 所示。

在线性比例范围内计算得的小等级扭矩的扭角平均增量为

$$\Delta A_{2000} = \frac{232 - 0}{50000 - 5000} \times 2000 \text{ 分度} = 10.3 \text{ 分度}$$

从总角读数中减去按每  $2000\text{N} \cdot \text{mm}$  对应的比例扭角为 10.3 分度这样计算的比例扭角部分, 即可得非比例扭角部分。

表 5-4 试 验 记 录

扭矩 $T/(\text{N} \cdot \text{mm})$	扭转计读数/分度	读数增量/分度	计算的比例扭角 读数/分度	计算的非比例扭角 读数/分度
5000	0	0	$\Delta A_{2000} = 10.3$	—
16000	53	53		—
27000	109	56		—
38000	165	56		—
40000	174	9		—
42000	186	12		—
44000	197	11		—
46000	207	10		—
48000	219	12		—
50000	232	13		—
52000	249	17	242.3	6.7
54000	270	21	252.6	17.4
56000	296	26	262.9	33.1

由于要测定的规定非比例扭转强度  $\tau_{p0.015}$ ，其规定的非比例切应变为 0.015%，所对应的扭转计分度数为

$$\left[ \left( 2 \times 0.015\% \times \frac{L_e}{d} \right) / 0.00025 \right] \text{分度} = \left[ \left( 2 \times \frac{0.015}{100} \times \frac{100.0}{10.00} \right) / 0.00025 \right] \text{分度}$$

= 12.0 分度

从表 5-6 中读出最接近非比例扭角为 12.0 分度时对应的扭矩为 52000N · mm，用内插法求出精确的扭矩值为

$$T_{p0.015} = \frac{(17.4 - 12.0) \times 52000 + (12.0 - 6.7) \times 54000}{(17.4 - 6.7)} \text{N} \cdot \text{mm}$$

= 52990.65N · mm

$$\tau_{p0.015} = \frac{T_{p0.015}}{W} = \frac{52990.65}{196.35} \text{N/mm}^2 = 269.879 \text{N/mm}^2$$

修约后为  $\tau_{p0.015} = 270 \text{N/mm}^2$ 。

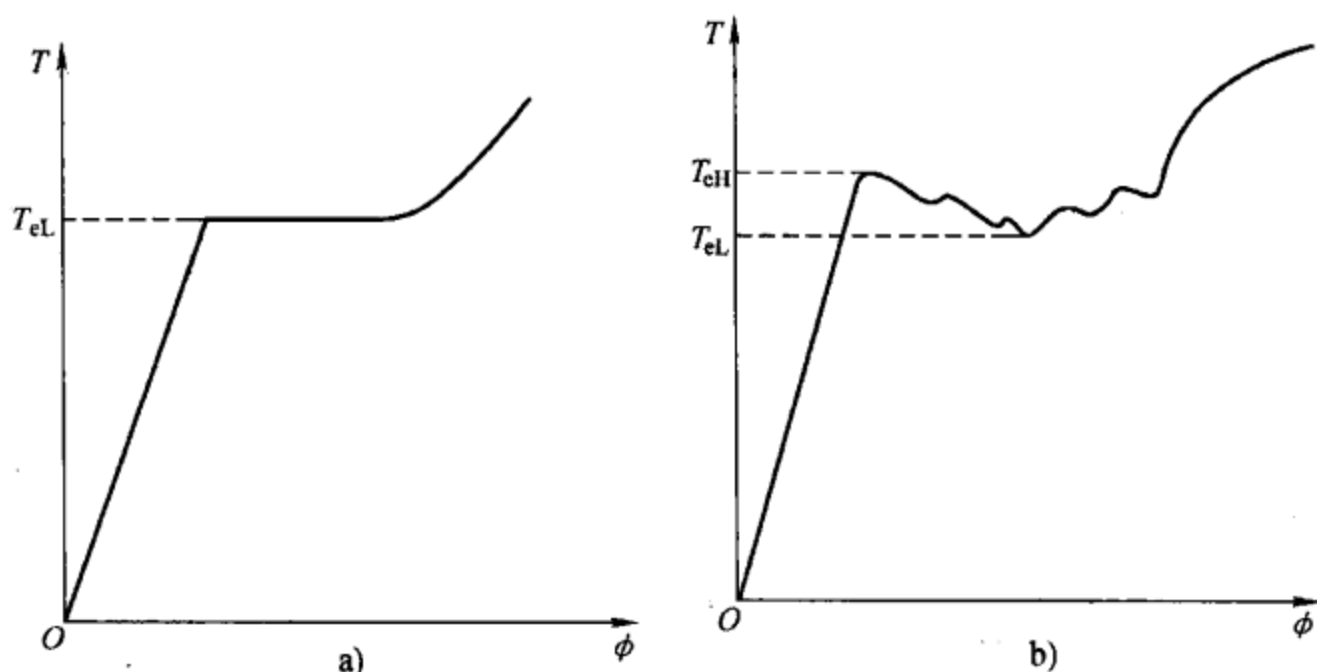


图 5-8 上屈服扭矩和下屈服扭矩

a) 下屈服扭矩 b) 上、下屈服扭矩

#### 5.5.4 上屈服强度和下屈服强度的测定

1) 试验时用自动记录方法记录扭矩-扭角( $T-\phi$ )曲线, 首次下降前的最大扭矩为上屈服扭矩, 屈服阶段中不计初始瞬时效应的最小扭矩为下屈服扭矩, 如图 5-8 所示。

2) 按下式计算上屈服强度:

$$\tau_{eH} = \frac{T_{eH}}{W} \quad (5-3)$$

式中  $\tau_{eH}$ ——上屈服强度, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$T_{eH}$ ——上屈服扭矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;

$W$ ——截面系数, 单位为  $\text{mm}^3$ 。

3) 按下式计算下屈服强度:

$$\tau_{eL} = \frac{T_{eL}}{W} \quad (5-4)$$

式中  $\tau_{eL}$ ——下屈服强度, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$T_{eL}$ ——下屈服扭矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;

$W$ ——截面系数, 单位为  $\text{mm}^3$ 。

#### 5.5.5 抗扭强度的测定

1) 对试样连续施加扭矩, 直至扭断。从记录的扭转曲线或试验机扭矩盘上读出试样扭断前所承受的最大扭矩, 如图 5-9 所示。

2) 按下式计算抗扭强度:

$$\tau_m = \frac{T_m}{W} \quad (5-5)$$

式中  $\tau_m$ ——抗扭强度, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  
 $T_m$ ——最大扭矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;  
 $W$ ——截面系数, 单位为  $\text{mm}^3$ 。

5.5.6 最大非比例切应变的测定

- 1) 对试样连续施加扭矩, 记录扭矩-扭角 ( $T-\phi$ ) 曲线, 直至扭断。
- 2) 过断裂点  $K$  作曲线的弹性直线段的平行线  $KJ$  交扭角轴于  $J$  点,  $OJ$  即为最大非比例扭角, 如图 5-9 所示。
- 3) 按下式计算最大非比例切应变:

$$\gamma_{\max}(\%) = \left( \frac{\phi_{\max} d}{2L_e} \right) \times 100\% \quad (5-6)$$

式中  $\gamma_{\max}$ ——最大非比例扭角, 单位为  $(^\circ)$ ;  
 $d$ ——圆柱形试样或管形试样平行长度部分的外直径, 单位为  $\text{mm}$ ;  
 $L_e$ ——扭转计标距, 单位为  $\text{mm}$ 。

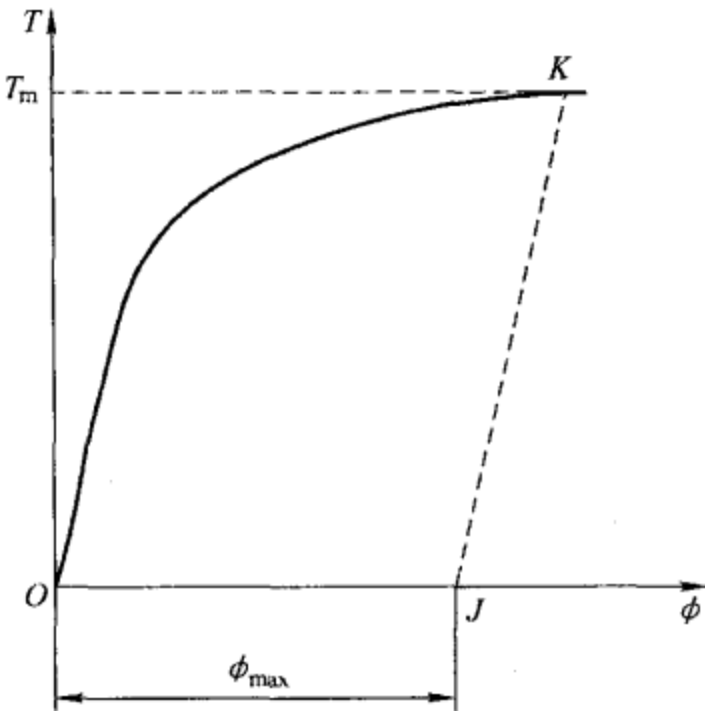


图 5-9 最大扭矩和最大非比例扭角  
 $T_m$ ——最大扭矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ )  
 $\phi_{\max}$ ——最大非比例扭角  $(^\circ)$

5.5.7 金属线材扭转性能的测定

- 1) 试样置于试验机后, 以合适的恒定速度旋转可转动夹头, 计数装置同时自动记数, 直至试样断裂或达到规定的次数为止。
- 2) 当试样的扭转次数、表面及断口符合有关标准规定时, 则该试验有效。如果试样未达到规定的次数, 且断口位置在离夹头  $2d$  ( $D$ ) 范围内, 则该试验无效。在试验过程中, 如试样发生严重劈裂, 则最后一次扭转次数不计。

5.5.8 测得性能数值的修约

测得性能数值的修约按表 5-5 的规定进行。

表 5-5 性能结果数值的修约间隔

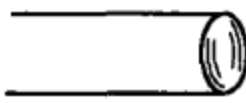
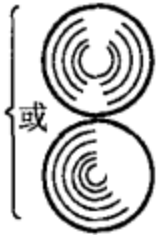
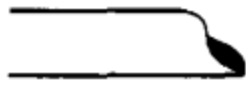
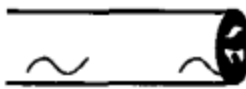
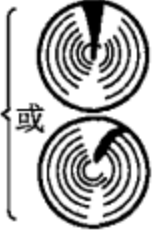
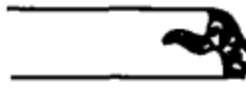
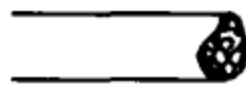



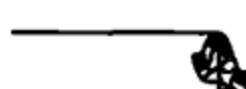
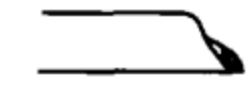
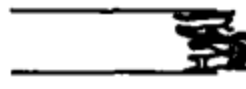
扭 转 性 能	范 围	修 约 到
$G/(\text{N}/\text{mm}^2)$	—	100
$\tau_p, \tau_{eH}, \tau_{eL}, \tau_m/(\text{N}/\text{mm}^2)$	$\leq 200$	1
	$> 200 \sim 1000$	5
	$> 1000$	10
$\gamma_{\max}(\%)$	—	0.5



5.6 扭转试样的断口形貌及特征

试样的扭转断裂类型、外观形貌及断口特征典型分类如表 5-6 所示。

表 5-6 试样的扭转断裂类型、外观形貌及断口特征典型分类

断裂类型	类型编号		外观形貌	断口特征描述	断裂面
正常扭转断裂	1	a		断裂面平滑且垂直于线材轴线(或稍微倾斜);断裂面上无裂纹	
		c		脆性断裂面与线材轴线约成 45°;断裂面上无裂纹	
局部裂纹断裂 (表面有局部裂纹)	2	a		断裂面平滑且垂直于线材轴线(或稍微倾斜),并有局部裂纹	
		b		阶梯式,部分断裂面平滑;并有局部裂纹	
		c		不规则断裂面,断裂面上无裂纹	
螺旋裂纹断裂 (试样全长或大部分长度上有螺旋型裂纹)	3	a		断裂面平滑且垂直于线材轴线(或稍微倾斜),断裂面上有局部或贯穿整个截面的裂纹	
		b		阶梯式,部分断裂面平滑;有局部或贯穿整个截面的裂纹	
		c	 	脆性断裂面与线材轴线约成 45°,并有局部或贯穿整个截面的裂纹 不规则断裂面,并有局部或贯穿整个截面的裂纹	

## 第6章 金属材料的压缩性能

### 6.1 压缩性能相关知识

#### 6.1.1 压缩性能及压缩试验的定义

压缩性能是指材料在压应力作用下抗变形和抗破坏的能力。

压缩试验是对试样施加轴向压力，在其变形和断裂过程中测定材料的强度和塑性。实际上，压缩与拉伸仅仅是受力方向相反。因此，金属拉伸试验时所定义的力学性能指标和相应的计算公式，在压缩试验中基本上都能适用。但两者之间也存在差别，与拉伸试验相比，压缩试验有如下特点：

1) 单向压缩的应力状态软性系数  $\alpha = 2$ 。因此，通常适用于脆性材料和低塑性材料，以显示其在静拉伸、扭转和弯曲试验时所不能反映的材料在韧性状态下的力学行为。对脆性更大的材料，为了更充分地显示材料的微小塑性差异，可采用应力状态软性系数  $\alpha > 2$  的多向压缩试验。

2) 塑性较好的金属材料（如退火钢、黄铜等）只能被压扁，一般不会被破坏，其压缩曲线如图 6-1 所示。

3) 脆性材料压缩破坏的形式有剪坏和拉坏两种。剪坏的断裂面与底面呈约  $45^\circ$  角。拉坏是由于试样的纤维组织与压应力方向一致，压缩试验时试样横截面积增加，而横向纤维伸长超过一定限度而破断。

4) 压缩试验时，试样端面存在很大的摩擦力，这将阻碍试样端面的横向变形（使试样呈腰鼓状），影响试验结果的准确性。试样高度与直径之比（ $L/d_0$ ）越小，其端面摩擦力对试验结果的影响越大。为了减小试样端面摩擦力的影响，可增加  $L/d_0$  的比值，但也不宜过大，以免引起纵向失稳。

#### 6.1.2 压缩试验常用术语

(1) 屈曲 除通过材料的压溃方式引起压缩失效外，以下几种方式也可能发

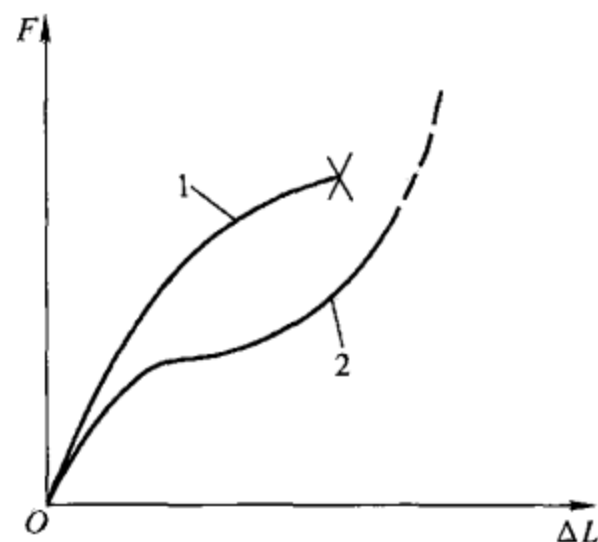


图 6-1 金属压缩曲线  
1—脆性材料 2—塑性材料

生压缩失效：

- 1) 由于非轴向加力而引起柱体试样在其全长度上的弹性失稳。
- 2) 柱体试样在其全长度上的非弹性失稳。
- 3) 板材试样标距内小区域上的弹性或非弹性局部失稳。
- 4) 试样横截面绕其纵轴转动而发生的扭曲或扭转失效。

以上这几种失效类型统称为屈曲。

(2) 单向压缩 试样受轴向压缩时，弯曲的影响可以忽略不计，标距内应力均匀分布，且在试验过程中不发生屈曲。

(3) 试样原始标距 ( $L_0$ ) 用以测量试样变形的那一部分原始长度，此长度应不小于试样原始宽度或试样原始直径。

(4) 实际压缩力 ( $F$ ) 压缩过程中作用在试样轴线方向上的力；对夹持在约束装置中进行试验的板状试样，是标距中点处扣除摩擦力后的力。

(5) 摩擦力 ( $F_f$ ) 被约束装置夹持的试样，在加力时，两侧面与夹板之间产生的摩擦力。

(6) 压缩应力 试验过程中试样的实际压缩力  $F$  与其原始横截面积  $S_0$  的比值。

(7) 规定非比例压缩强度 ( $R_{pc}$ ) 试样标距段的非比例压缩变形达到规定的原始标距百分比时的压缩应力。表示此压缩强度的符号应以下标说明，例如  $R_{pc0.1}$  表示规定非比例压缩应变为 0.1% 时的压缩应力。

(8) 规定总压缩强度 ( $R_{tc}$ ) 试样标距段的总压缩变形（弹性变形加塑性变形）达到规定的原始标距百分比时的压缩应力。表示此压缩强度的符号应附以下标说明，例如  $R_{tc2}$  表示规定总压缩应变为 2% 时的压缩应力。

(9) 压缩屈服强度 当金属材料呈现屈服现象时，试样在试验过程中达到力不再增加而仍继续变形时所对应的压缩应力，应区分上压缩屈服强度和下压缩屈服强度。

(10) 上压缩屈服强度 ( $R_{eHc}$ ) 试样发生屈服而力首次下降前的最高压缩应力。

(11) 下压缩屈服强度 ( $R_{eLc}$ ) 屈服期间不计初始瞬时效应时的最低压缩应力。

(12) 抗压强度 ( $R_{mc}$ ) 对于脆性材料，试样压至破坏过程中的最大压缩应力。对于在压缩中不以粉碎性破裂而失效的塑性材料，则抗压强度取决于规定应变和试样几何形状。

(13) 压缩弹性模量 ( $E_c$ ) 试验过程中，轴向压应力与轴向应变成线性比例关系范围内的轴向压应力与轴向应变的比值。

## 6.2 压缩试样的制备

### 6.2.1 试样的一般要求

- 1) 试样形状与尺寸的设计应保证在试验过程中标距内为均匀单向压缩，引伸

计所测变形应与试样轴线上标距段的变形相等，端部不应在试验结束之前损坏。

2) 切取样坯和机加工试样时，应防止因冷加工或热影响而改变材料的性能。

3) 板状试样厚度为原材料厚度时，应保留原表面，表面上不应有划痕等损伤。试样厚度为机加工厚度时，表面粗糙度应不高于原表面粗糙度。厚度（或直径）在标距内的允许偏差为1%或0.05mm时，取其较小值。

4) 试样应平直，从板卷或带卷上切取的试样，允许带有不影响性能测定的轻微弯曲。

5) 试样原始标距不应小于试样直径（或宽度）的1/2。

### 6.2.2 侧向无约束试样

侧向无约束试样包括圆柱体试样和正方形柱体试样，如图6-2和图6-3所示。长度是直径（或宽度）1~2倍的试样适用于测定 $R_{mc}$ ，长度是直径（或宽度）2.5~3.5倍的试样适用于测定 $R_{pc}$ 、 $R_{tc}$ 、 $R_{eLc}$ 、 $R_{eHc}$ 和 $R_{mc}$ ，长度是直径（或宽度）5~8倍的试样适用于测定 $R_{p0.01}$ 和 $E_c$ 。

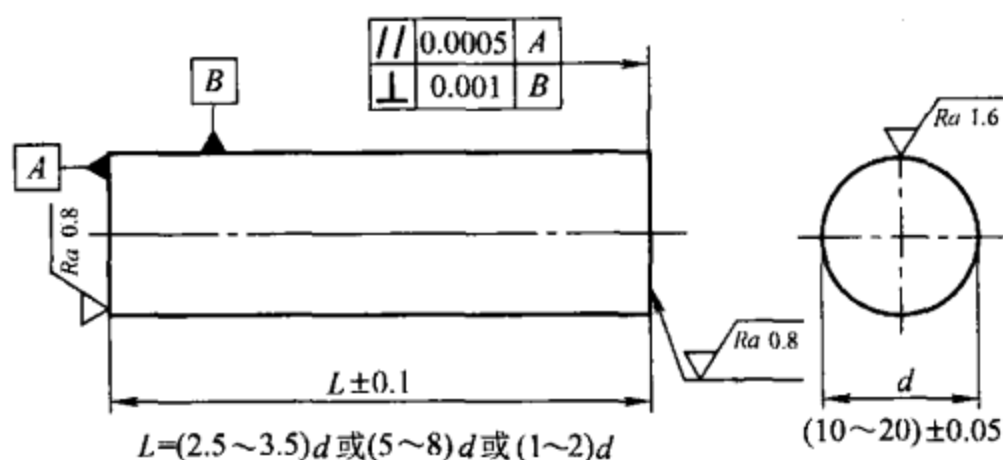


图6-2 圆柱体试样

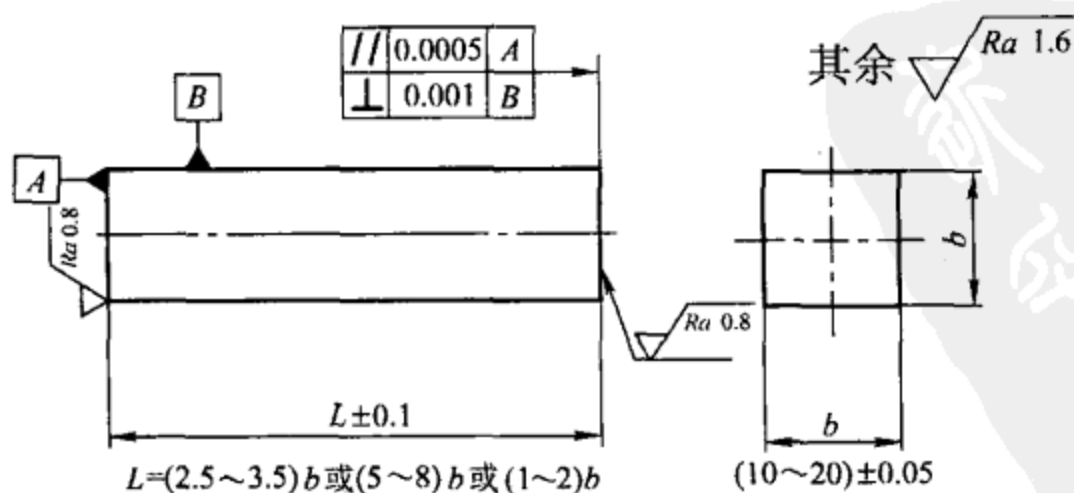


图6-3 正方形柱体试样

6.2.3 板状试样

1) 板状试样包括矩形板试样和带凸耳板状试样，如图 6-4 和图 6-5 所示，试验时需夹持在约束装置内进行试验。

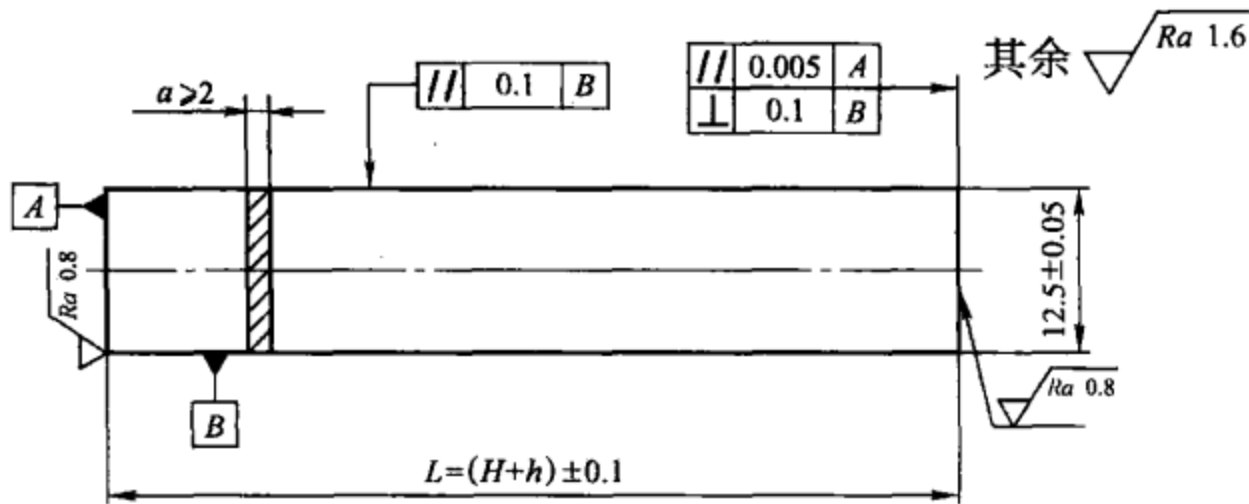


图 6-4 矩形板试样

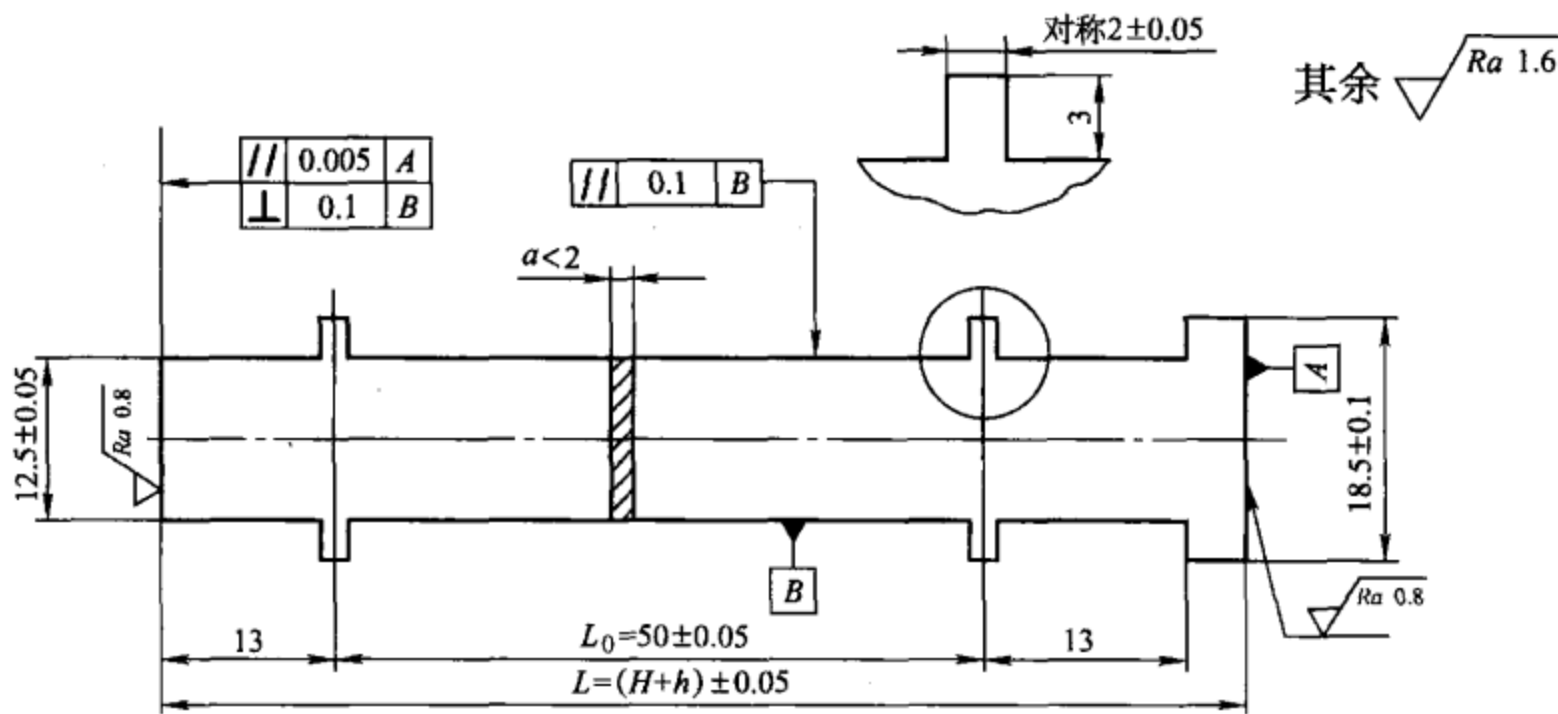


图 6-5 带凸耳板状试样

2) 板状试样的形状和尺寸如表 6-1 所示。

表 6-1 板状试样的形状和尺寸 (单位: mm)

厚度	宽度
0.1 ~ <2	12.5
2 ~ <10	12.5
≥10	≥10

注: 厚度小于 0.3mm 的试样, 一般把头部弯成“U”形。

6.2.4 试样尺寸测量

- 1) 板状及正方形柱体试样厚度和宽度，应在试样原始标距中点处测量。圆柱体试样应在原始标距中点处两个相互垂直的方向上测量直径，取其算术平均值。
- 2) 测量带凸耳板状试样时，原始标距为两侧面的每一侧面两凸耳沿试样轴线方向的内侧距离和外侧距离总和的 1/4。测量时量具不应靠近凸耳根部。
- 3) 量具或测量装置按表 6-2 选用，根据需测量的试样的原始尺寸计算原始横截面积，至少保留 4 位有效数字。

表 6-2 量具或测量装置的分辨力 (单位: mm)

试样横截面尺寸	分辨力≤	试样横截面尺寸	分辨力≤
0.1 ~ 0.5	0.001	> 2.0 ~ 10	0.01
> 0.5 ~ 2.0	0.002	> 10	0.05

6.3 压缩试验机及其附属装置

6.3.1 压缩试验机

- 1) 试验机准确度应为 1 级或优于 1 级，并应按照 GB/T 16825.1—2008 《静力单轴试验机的检验 第 1 部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准》进行检验。
- 2) 试验机上、下压板的工作表面应平行，平行度误差不大于 0.0002mm/mm (安装试样区 100mm 范围内)。试验过程中，压头与压板间不应有侧向的相对位移或转动，压板的硬度应不低于 55HRC。
- 3) 硬度较高试样的两端应垫以合适的硬质材料做成的垫板，试验后，板面不应有永久变形。垫板上下两端面的平行度误差应不大于 0.0002mm/mm，表面粗糙度  $Ra$  的最大值为 0.8 $\mu$ m。

6.3.2 附属装置

1. 力导向装置

为了保证试验机垂直施加试验力，应加配力导向装置，如图 6-6 所示。

2. 调平垫块

试验时如果出现偏心压缩现象，可配用调平垫块，如图 6-7 所示。



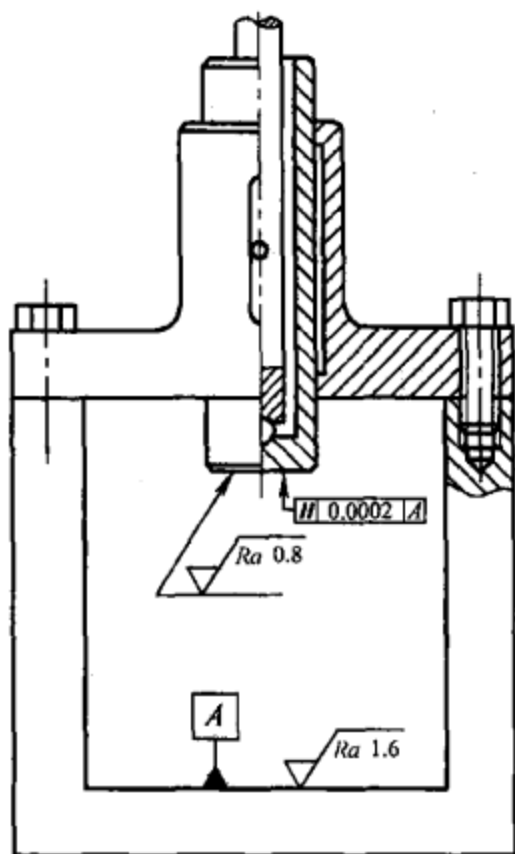


图 6-6 力导向装置

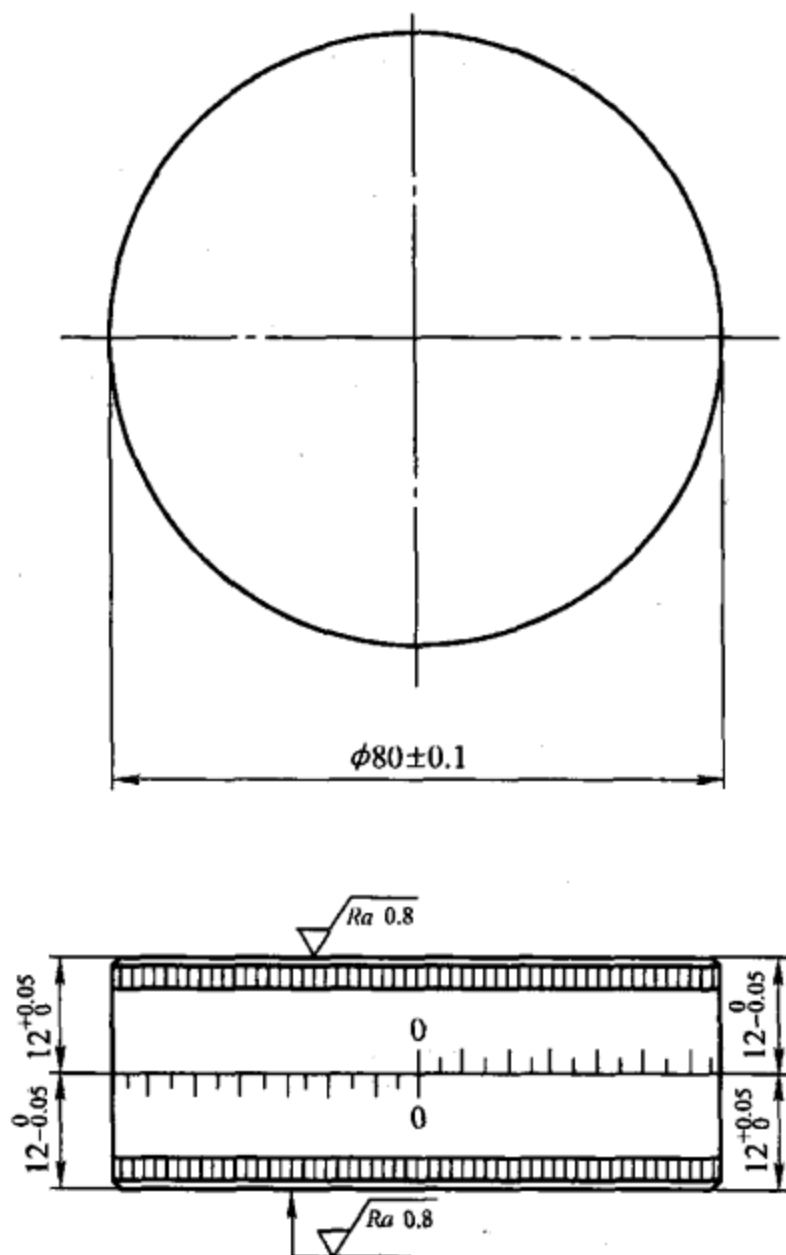


图 6-7 调平垫块

### 3. 约束装置

板状试样压缩试验，应使用约束装置。约束装置应使试样在低于规定的力作用下不发生屈曲，不影响试样轴向自由收缩及沿宽度和厚度方向的自由胀大，试验过程摩擦力为一个定值。常用约束装置如图 6-8 所示。

### 4. 防护罩

进行脆性材料试验时，应用有机玻璃或铁纱做成防护罩。将试样罩在里面，防止试样碎片飞出伤人或损坏仪器。

### 5. 引伸计

1) 引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160—2002《单轴试验用引伸计的标定》的要求。测定压缩弹性模量应使用不低于 0.5 级准确度的引伸计。测定规定非比例压缩强度、规定总压缩强度、上压缩屈服强度和下压缩屈服强度，应使用不低于 1 级准确度的引伸计。

2) 测定压缩弹性模量和规定非比例压缩应变小于 0.05% 的规定非比例压缩强度时，应采用平均引伸计。

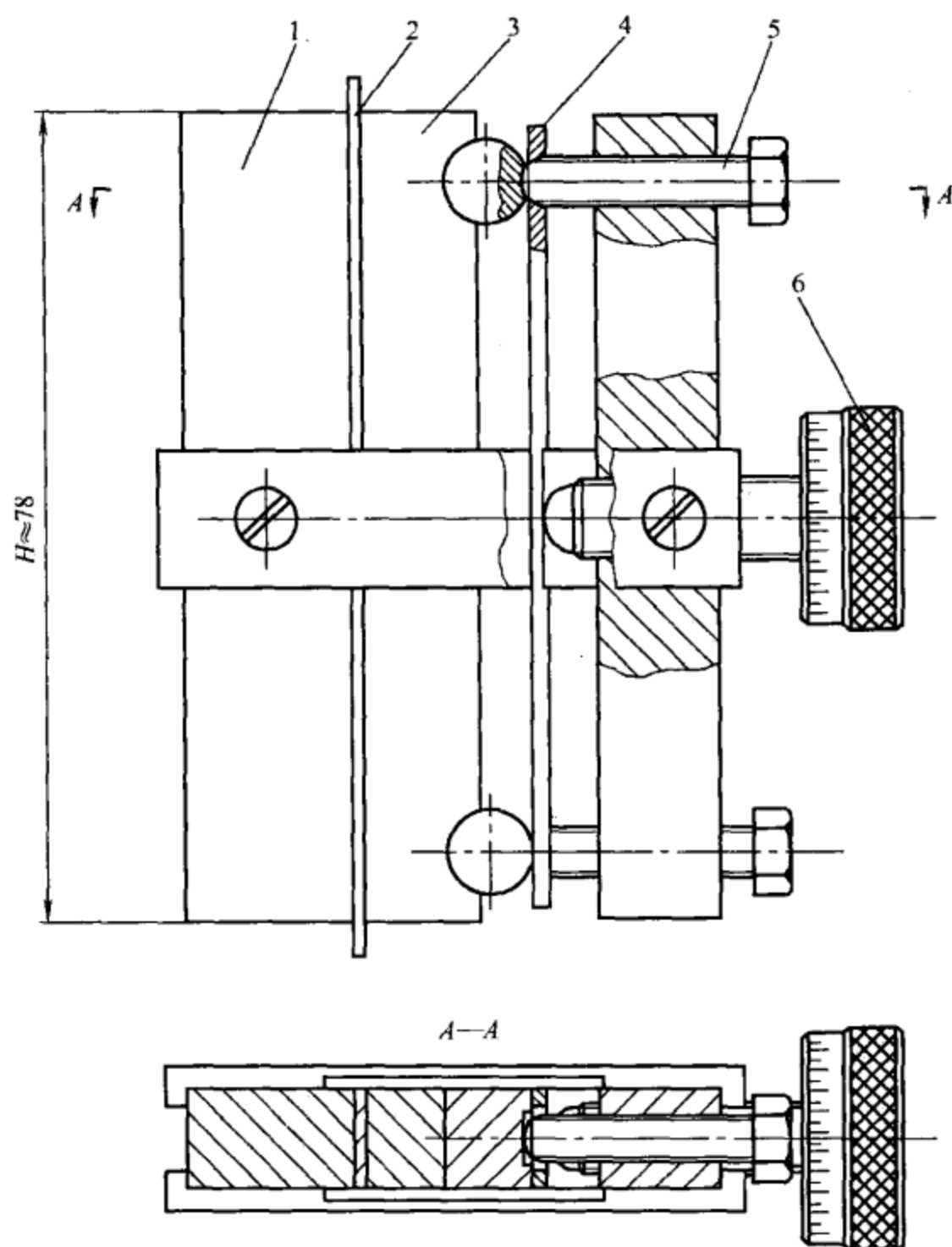


图 6-8 约束装置

1—夹板 2—试样 3—夹板 4—板簧 5—限位螺钉 6—夹紧螺钉

## 6.4 试验要求

1) 试验一般在  $10 \sim 35^{\circ}\text{C}$  范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为  $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。

2) 板材试样装进约束装置前，两侧面与夹板间应铺一层厚度不大于  $0.05\text{mm}$  的聚四氟乙烯薄膜，或均匀涂一层润滑剂，如小于  $70\mu\text{m}$  的石墨粉调以适量的精密仪表油的润滑剂，减小摩擦。

3) 板状试样铺薄膜或涂润滑剂之前, 应用无腐蚀的溶剂清洗。装夹后, 应把两端面用细纱布擦干净。

4) 安装试样时, 试样纵轴中心线应与压头轴线重合。

5) 在弹性 (或接近弹性) 范围内, 采用控制应力速率的方法, 其应力速率控制在  $1 \sim 10 (\text{N/mm}^2)/\text{s}$  范围内。在明显塑性变形范围内, 采用控制应变速率的方法, 其应变速率控制在  $0.00005 \sim 0.0001/\text{s}$  范围内。对于无应变调速装置的试验机, 应保持恒定的夹头速度, 以便得到从加力开始至试验结束所要求的平均应变速率。

## 6.5 压缩性能的测定

### 6.5.1 板状试样夹紧力的选择

根据材料的规定非比例压缩强度  $R_{\text{pc}0.2}$  (或下压缩屈服强度  $R_{\text{eLc}}$ ) 及板材厚度来选择夹紧力。一般使摩擦力  $F_f$  不大于规定非比例压缩变形的实际压缩力  $F_{\text{pc}0.2}$  估计值的 2%。对极薄试样 (厚度小于 0.3mm 的试样为极薄试样), 允许摩擦力  $F_f$  达到规定非比例压缩变形的实际压缩力  $F_{\text{pc}0.2}$  估计值的 5%。在保证试验正常进行的条件下, 夹紧力应尽可能小。

### 6.5.2 板状试样实际压缩力的测定

试验时自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线, 一般初始部分因受摩擦力影响而并非线性关系, 如图 6-9 所示。

当力足够大时, 摩擦力达到一个定值, 此后摩擦力不再进一步影响力-变形曲线。设摩擦力平均分布在试样表面上, 则实际压缩力可按下列式计算:

$$F = F_0 - \frac{1}{2} F_f$$

式中  $F$ ——实际压缩力, 单位为 N;

$F_0$ ——试样上端所受的力, 单位为 N;

$F_f$ ——摩擦力, 单位为 N。

在自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上, 沿弹性直线段, 反延直线交原横坐标轴于  $O''$ , 在原横坐标轴原点  $O'$  与  $O''$  的连线中点上, 作垂线交反延的直线于  $O$  点,  $O$  点即为力-变形

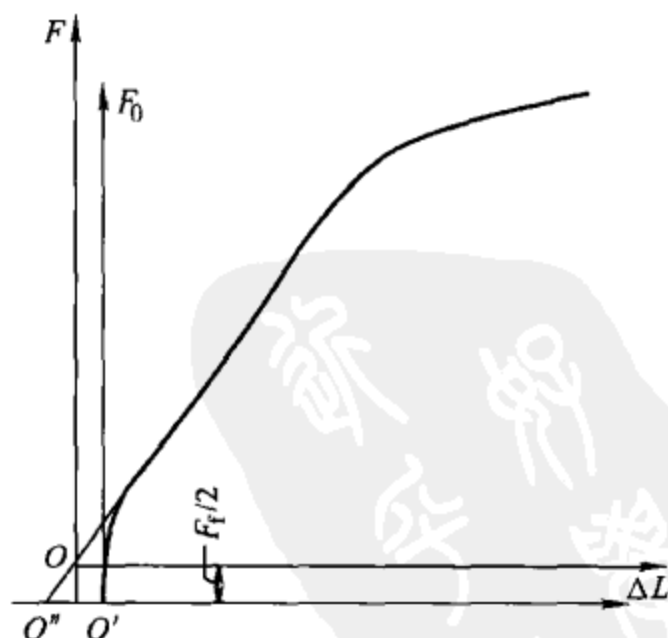


图 6-9 图解法确定实际压缩力  
 $F$ —实际压缩力 (N)  $F_0$ —试样上端所受的力 (N)  $F_f$ —摩擦力 (N)  
 $\Delta L$ —原始标距段受力后的变形 (mm)

曲线的真实原点。过  $O$  点作平行原坐标轴的直线，即为修正后的坐标轴，实际压缩力可在新坐标系上直接判读，如图 6-9 所示。

### 6.5.3 规定非比例压缩强度的测定

#### 1. 图解法

1) 先用力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图解法测定规定非比例压缩力，如图 6-10 所示。力轴的比例应使所求规定非比例压缩变形的实际压缩力  $F_{pc}$  点位于力轴的  $1/2$  以上，变形放大倍数的选择应保证图 6-10 中的  $OC$  段长度不小于  $5\text{mm}$ 。

2) 在自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上，自  $O$  点起，截取一段相当于规定非比例变形的距离  $OC$  ( $\varepsilon_{pc} L_0 n$ )，过  $C$  点作平行于弹性直线段的直线  $CA$  交曲线于  $A$  点，其对应的力  $F_{pc}$  为所测规定非比例压缩力。规定非比例压缩强度按下式计算：

$$R_{pc} = \frac{F_{pc}}{S_0}$$

式中  $R_{pc}$ ——规定非比例压缩强度，单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ；

$F_{pc}$ ——规定非比例压缩变形的实际压缩力，单位为  $\text{N}$ ；

$S_0$ ——试样原始横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ 。

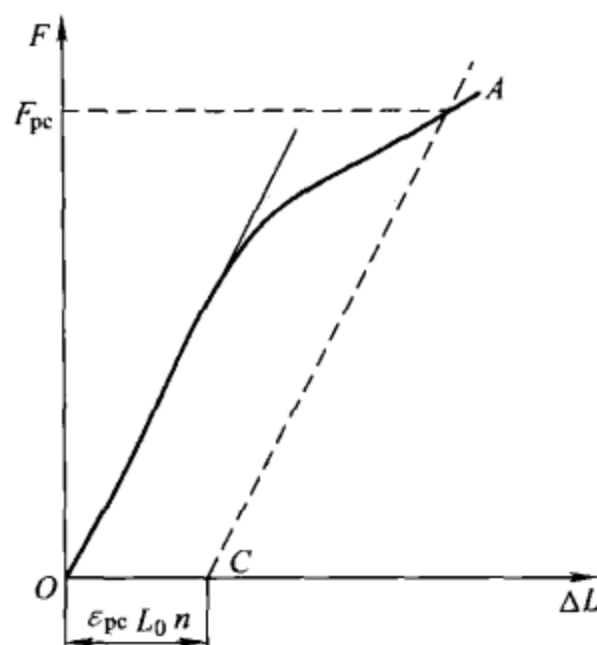


图 6-10 图解法求  $F_{pc}$

#### 2. 逐步逼近法

1) 如果力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线无明显的弹性直线段，可采用逐步逼近法。

2) 先在曲线上直观估读一点  $A_0$ ，约为规定非比例压缩应变  $0.2\%$  的力  $F_{A_0}$ ，而后在微弯曲线上取  $G_0$ 、 $Q_0$  两点，其分别对应的力为  $0.1F_{A_0}$ 、 $0.5F_{A_0}$ ，作直线  $G_0Q_0$ ，过  $C$  点作平行于  $G_0Q_0$  的直线  $CA_1$  交曲线于  $A_1$  点，如  $A_1$  点与  $A_0$  点重合，则  $F_{A_0}$  即为  $F_{pc}$ ，如图 6-11 所示。 $G_0Q_0$  直线的斜率一般可以用于图解确定其他规定非比例压缩强度的基准。

3) 如  $A_1$  点未与  $A_0$  点重合，需要按照上述步骤进行进一步逼近。此时，取  $A_1$  点对应的力  $F_{A_1}$  来分别确定  $0.1F_{A_1}$ 、 $0.5F_{A_1}$  对应的点  $G_1$ 、 $Q_1$ ，然后如前述过  $C$  点作平行线来确定交点  $A_2$ ，重复相同步骤直至最后一次得到的交点与前一次的重合。

### 6.5.4 规定总压缩强度的测定

1) 总压缩变形一般应超过变形轴的  $1/2$  以上。

$F$ —实际压缩力 ( $\text{N}$ )  $\Delta L$ —原始标距段受力后的变形 ( $\text{mm}$ )  $\varepsilon_{pc}$ —规定非比例压缩应变 (%)  $L_0$ —试样原始标距 ( $\text{mm}$ )  
 $n$ —变形放大倍数

2) 在自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上, 自  $O$  点起在变形轴上取  $OD$  段 ( $\varepsilon_{tc} L_0 n$ ), 过  $D$  点作与力轴平行的  $DM$  直线交曲线于  $M$  点, 其对应的力  $F_{tc}$  为所测规定总压缩力, 如图 6-12 所示。

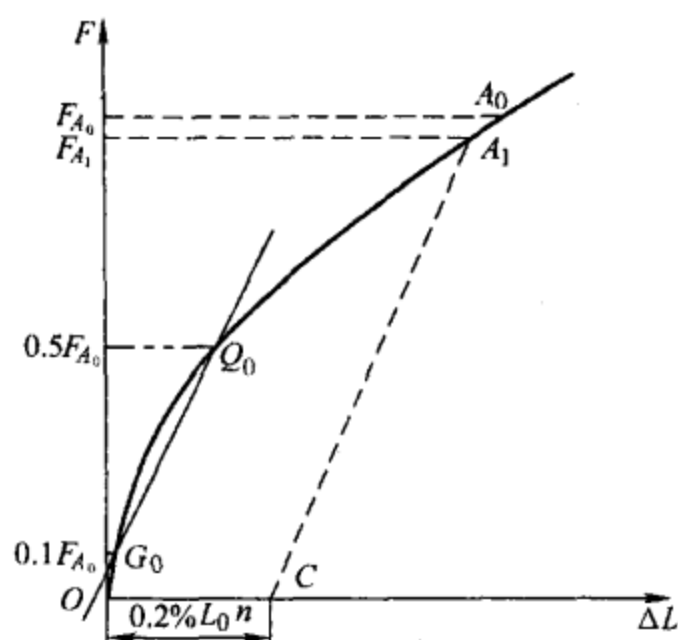


图 6-11 逐步逼近法求  $F_{pc}$

$F$ —实际压缩力 (N)  $\Delta L$ —原始标距段受力后的变形 (mm)  $L_0$ —试样原始标距 (mm)  
 $n$ —变形放大倍数

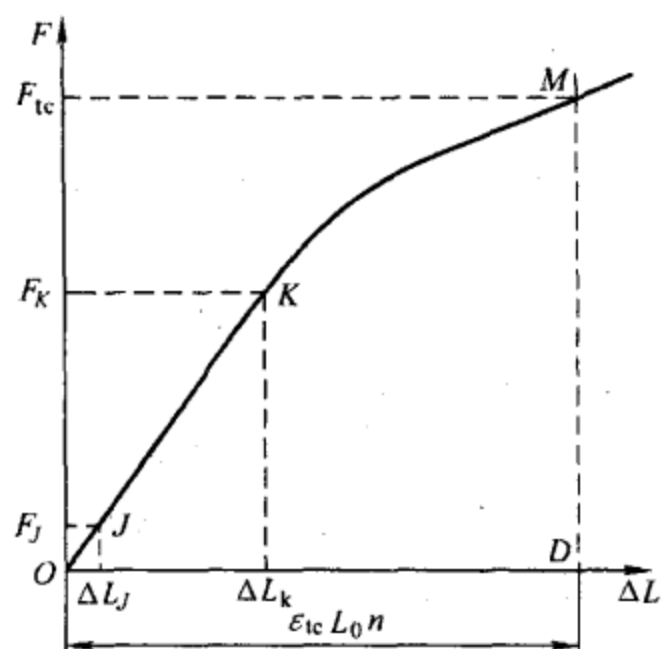


图 6-12 图解法求  $F_{tc}$

$F$ —实际压缩力 (N)  $\Delta L$ —原始标距段受力后的变形 (mm)  $\varepsilon_{tc}$ —规定总压缩应变 (%)  
 $L_0$ —试样原始标距 (mm)  $n$ —变形放大倍数

3) 规定总压缩强度按下式计算:

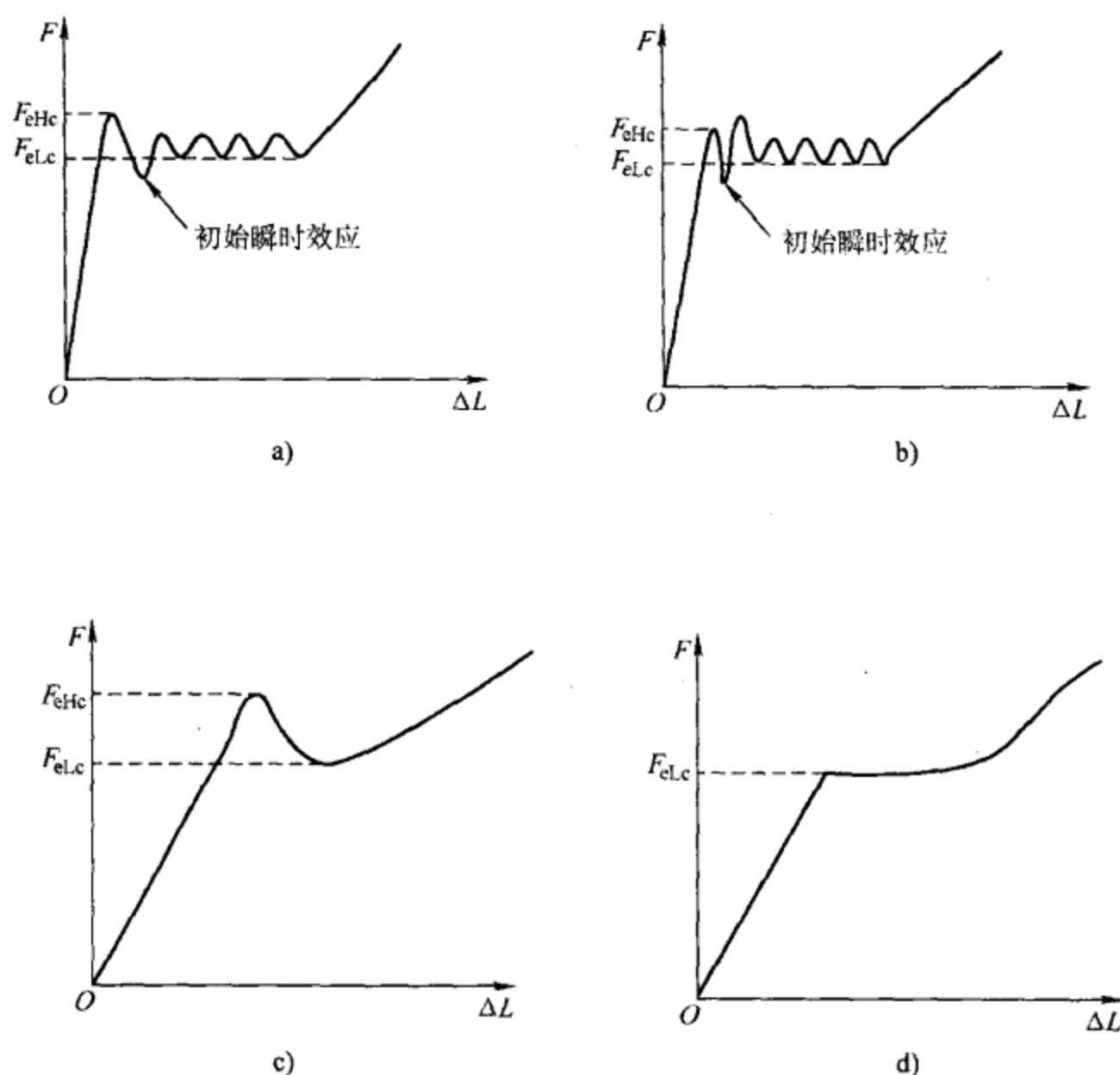
$$R_{tc} = \frac{F_{tc}}{S_0}$$

式中  $R_{tc}$ ——规定总压缩强度, 单位为  $N/mm^2$ ;  
 $F_{tc}$ ——规定总压缩变形的实际压缩力, 单位为 N;  
 $S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $mm^2$ 。

### 6.5.5 上压缩屈服强度和下压缩屈服强度的测定

1) 呈现明显屈服 (不连续屈服) 现象的金属材料, 一般需规定测定上压缩屈服强度或下压缩屈服强度, 或两者均作规定。如未具体规定, 仅测定下压缩屈服强度。

2) 在自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上 (见图 6-13), 判读力首次下降前的最高实际压缩力 ( $F_{eHc}$ )、不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最低实际压缩力或屈服平台的恒定实际压缩力 ( $F_{eLc}$ )。

图 6-13 图解法求  $F_{eHc}$  和  $F_{eLc}$ 

a) 第一种屈服形式 b) 第二种屈服形式 c) 第三种屈服形式 d) 第四种屈服形式

 $F_{eHc}$ —屈服时的实际上屈服压缩力 (N)  $F_{eLc}$ —屈服时的实际下屈服压缩力 (N) $\Delta L$ —原始标距段受力后的变形 (mm)

3) 上压缩屈服强度和下压缩屈服强度按下式计算:

$$R_{eHc} = \frac{F_{eHc}}{S_0}$$

$$R_{eLc} = \frac{F_{eLc}}{S_0}$$

式中  $R_{eHc}$ ——上压缩屈服强度, 单位为  $N/mm^2$ ; $F_{eHc}$ ——屈服时的实际上屈服压缩力, 单位为 N; $R_{eLc}$ ——下压缩屈服强度, 单位为  $N/mm^2$ ; $F_{eLc}$ ——屈服时的实际下屈服压缩力, 单位为 N; $S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $mm^2$ 。



### 6.5.6 抗压强度的测定

1) 试样压至破坏, 从力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上确定最大实际压缩力  $F_{mc}$  (见图 6-14), 或从测力度盘读取最大力值。

2) 抗压强度按下式计算:

$$R_{mc} = \frac{F_{mc}}{S_0}$$

式中  $R_{mc}$ ——脆性材料的抗压强度或塑性材料的规定应变条件下的压缩应力, 单位为  $N/mm^2$ ;

$F_{mc}$ ——脆性材料试样压至破坏过程中的最大实际压缩力或塑性材料规定应变条件下的压缩力, 单位为  $N$ ;

$S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $mm^2$ 。

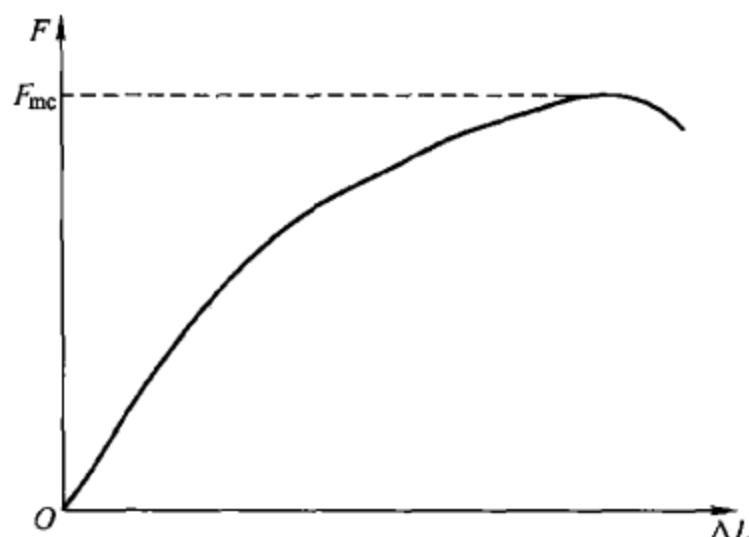


图 6-14 图解法求  $R_{mc}$

$\Delta L$ ——原始标距段受力后的变形 ( $mm$ )

$F_{mc}$ ——脆性材料试样压至破坏过程中的最大实际压缩力或塑性材料规定应变条件下的压缩力 ( $N$ )

3) 对于塑性材料, 根据应力-应变曲线在规定应变下, 测定其抗压强度, 在报告中应指明所测应力处的应变。

### 6.5.7 压缩弹性模量的测定

1) 如图 6-12 所示, 在自动绘制的力-变形 ( $F-\Delta L$ ) 曲线图上, 取弹性直线段上  $J$ 、 $K$  两点 (点距应尽可能长), 读出对应的力  $F_J$ 、 $F_K$ , 变形  $\Delta L_J$ 、 $\Delta L_K$ 。

2) 压缩弹性模量按下式计算:

$$E_c = \frac{(F_K - F_J)L_0}{(\Delta L_K - \Delta L_J)S_0}$$

式中  $E_c$ ——压缩弹性模量, 单位为  $N/mm^2$ ;

$L_0$ ——试样原始标距, 单位为  $mm$ ;

$S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $mm^2$ 。

3) 如材料无明显的弹性直线段, 在无其他规定时, 可用逐步逼近法求解。

### 6.5.8 压缩性能测定结果数值的修约

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如果未规定具体要求, 测得的强度性能结果应按照表 6-3 的要求进行修约。弹性模量测定结果保留 3 位有效数字, 修约的方法采用 GB/T 8170—2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》。

表 6-3 强度性能结果数值的修约间隔 (单位: N/mm<sup>2</sup>)

性 能	范 围	修 约 间 隔
$R_{pe}、R_{te}、R_{eHc}、R_{eLc}、R_{mc}$	$\leq 200$	1
	$> 200 \sim 1000$	5
	$> 1000$	10

6.6 压缩试样的破坏形式

压缩试验时，试样的破坏形式与材料的性质及端面的支承情况有关。对于塑性材料，在试验过程中仅作侧向扩张，即高度降低，断面扩大，形成一鼓形或圆板状。对于脆性材料（如铸铁、高碳钢等材料），在压缩时，由于端面存在很大摩擦力，这种摩擦力阻碍试样端面的横向变形，出现上下两端面小而中间凸的腰鼓形。图 6-15 所示为脆性材料在有端面摩擦和无端面摩擦时的破坏情况。压缩试验时，要设法减少端面摩擦的影响，以得到稳定的试验结果。为此，要求试样压头和端面加工表面粗糙度值要小，试验时端面涂以润滑脂，还可以采用端面上带有蓄油槽的试样。

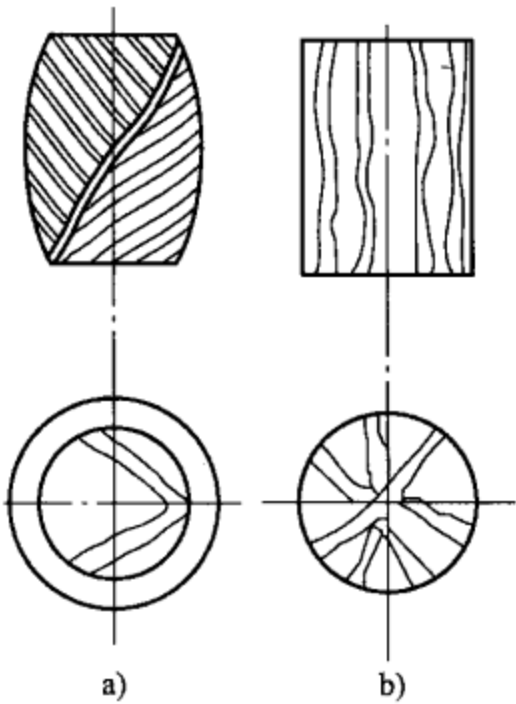


图 6-15 脆性材料端面摩擦力对压缩破坏的影响  
a) 有端面摩擦 b) 无端面摩擦

## 第7章 金属材料的弯曲性能

### 7.1 弯曲性能相关知识

#### 7.1.1 弯曲性能和弯曲试验的定义

弯曲性能指材料承受弯曲载荷时的力学性能。

用脆性材料制造的刀具和机器零件，在使用过程中都受到不同程度的弯曲载荷，对它们来说，弯曲试验具有特别重要的意义。此外，淬硬的工具钢、硬质合金、铸铁等进行试验时，由于试样太硬或者太小，难于加工成拉伸试样，或由于过脆，试验时试样中心轴线略有偏差就会影响试验结果的准确性，都不宜作拉伸试验。脆性材料的弯曲试验，一般在弹性变形范围内仅产生少量塑性变形即破断。生产上常用弯曲试验评定上述材料的抗弯强度及塑性变形的大小。

弯曲试验和拉伸试验相比，能明显地显示脆性材料或低塑性材料的塑性。因为脆性材料在作拉伸试验时变形很小就断裂了，因而塑性指标不易测定，但在弯曲试验时，用挠度表示塑性，就能明显的显示脆性材料和低塑性材料的塑性。

弯曲试验不受试样偏斜的影响，可以较好地测定脆性材料和低塑性材料的抗弯强度。进行弯曲试验时，试样表面上的应力分布不均匀，表面应力最大，对表面缺陷较敏感。因此，常用弯曲试验来比较和鉴定渗碳热处理及高频感应淬火等表面处理工件的表面质量和缺陷。

#### 7.1.2 弯曲试验常用术语

(1) 跨距 ( $L_s$ ) 弯曲试验装置上试样两支承点间的距离。

(2) 挠度计跨距 ( $L_c$ ) 用挠度计测量试样挠度时，在试样上两测点间的距离。

(3) 力臂 ( $L$ ) 四点弯曲试验中弯曲力作用平面或作用线与最近支承点间的距离。

(4) 弯曲力 ( $F$  或  $F/2$ ) 垂直于试样两支承点间连线的横向集中力。

(5) 最大弯曲应力 弯曲力在试样弯曲外表面产生的最大正应力。

(6) 最大弯曲应变 弯曲力在试样弯曲外表面产生的最大拉应变。

(7) 弯曲弹性模量 ( $E_b$ ) 弯曲应力与弯曲应变呈线性比例关系范围内的弯曲

应力与弯曲应变之比。

(8) 规定非比例弯曲应力 ( $\sigma_{pb}$ ) 弯曲试验中, 试样弯曲外表面上的非比例弯曲应变达到规定值时, 按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。表示此应力的符号应附以下标说明, 如  $\sigma_{pb0.2}$  表示规定非比例弯曲应变达到 0.2% 时的最大弯曲应力。

(9) 规定残余弯曲应力 ( $\sigma_{rb}$ ) 对试样施加弯曲力和卸除此力后, 试样弯曲外表面上的残余弯曲应变达到规定值时, 按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。表示此应力的符号应附以下标说明, 如  $\sigma_{rb0.1}$  表示规定残余弯曲应变达到 0.1% 时的最大弯曲应力。

(10) 抗弯强度 ( $\sigma_{bb}$ ) 试样弯曲至断裂, 断裂前所达到的最大弯曲力, 按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。

(11) 挠度 ( $f$ ) 试样弯曲时, 其中性线偏离原始位置的最大距离。

(12) 断裂挠度 ( $f_{bb}$ ) 试样弯曲断裂时的挠度。

(13) 弯曲断裂能量 ( $U$ ) 试样弯曲至断裂所需的能量。

7.2 弯曲试样的制备

7.2.1 试样的一般要求

1) 样坯切取的方向和部位应按 GB/T 2975—1998《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》的规定执行, 切取样坯和机加工试样的方法不应改变材料的弯曲力学性能。

2) 试样应平直, 从盘卷切取的薄板试样允许稍有弯曲, 但曲率半径与厚度之比应大于 500, 不允许对试样进行矫直或矫平。

3) 机加工试样的尺寸偏差和形状公差按表 7-1 的规定。形状公差为跨距范围内同一横截面尺寸的最大值与最小值之差。

表 7-1 试样的尺寸偏差和形状公差 (单位: mm)

试样横截面尺寸范围	非机加工试样		机加工试样	
	尺寸偏差	形状公差	尺寸偏差	形状公差
>3 ~ 5	±0.5	公称尺寸的 3%	±0.05	0.03
>5 ~ 10	±1.0		±0.10	0.05
>10 ~ 20	±1.5		±0.15	0.08
>20 ~ 45	±2.0		±0.20	0.10

4) 硬金属试样的四个相邻侧面的表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $0.4\mu m$ 。四条长棱

应进行 45°角倒棱，倒棱宽度不应超过 0.5mm。倒棱磨削机加工方向与试样长度方向相同。

- 5) 薄板试样的两个宽面应保留原表面，两窄面的机加工表面粗糙度  $Ra$  一般不大于  $6.3\mu\text{m}$ ，并应去除试样棱边的毛刺。
- 6) 铸造试样需要机加工时，其表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $3.2\mu\text{m}$ 。
- 7) 进行对比试验时，试样横截面形状、尺寸和跨距应相同。
- 8) 制备试样时，应使由于发热和加工硬化的影响减至最小。试样表面应无裂纹和伤痕，棱边应无毛刺。

7.2.2 圆形横截面和矩形横截面试样

采用圆形横截面试样和矩形横截面试样时，试样的形状、尺寸、公差及表面要求按表 7-2 或表 7-3 中的规定。

表 7-2 常用尺寸的要求 (单位: mm)

试 样	试样直径 $d$	试样高度 × 试样宽度 $h \times b$	三点弯曲		四点弯曲		支承滚柱直径 $D_s$ 施力滚柱直径 $D_a$	
			跨距 $L_s$	试样长度 $L$	跨距 $L_s$	试样长度 $L$		
圆形横截面	5		$\geq 16d$	$L_s + 20$			10	
	10							
	13							
	20			20 或 30				
	30			30				
	45							
矩形横截面 (硬金属用)		5 × 5	30	35	$\geq 16h$		5	
		5.25 × 6.5	14.5	20				
		5 × 5	$\geq 16h$	$L_s + 20$				$L_s + 20$
		5 × 7.5						
		10 × 10						
		10 × 15						
		13 × 13						
		13 × 19.5						
		20 × 20	$L_s + h$	$L_s + h$			20 或 30	
		20 × 30						
		30 × 30						30
		30 × 40						

表 7-3 薄板试样的要求 (单位: mm)

薄板试样横截面尺寸		试样高度 $h$	跨距 $L_s$	试样长度 $L$	刀刃半径 $R$
产品宽度					
$\leq 10$	$> 10$				
试样宽度 $\times$ 试样高度 $b \times h$	10 $\times$ 试样高度 10 $\times h$	0.25 ~ 0.5	100 $h$ ~ 150 $h$	250 $h$	0.10 ~ 0.15
		$> 0.5 \sim 1.5$	50 $h$ ~ 100 $h$	160 $h$	
		$> 1.5 \sim < 5$	80 ~ 120	110 ~ 150	2.5

7.2.3 金属管试样

金属管试样应是金属直管的一部分，外径不超过  $\phi 65\text{mm}$ ，并能在弯管试验机上进行试验。

7.2.4 焊接接头试样

1. 对接接头正弯试样

这种试样是焊缝表面为受拉面的试样，双面焊时焊缝表面为焊缝较宽或焊接开始的一面，如图 7-1 和图 7-2 所示。试样厚度  $t_s$  应等于焊接接头处母材的厚度。当要求对整个厚度（30mm 以上）进行试验时，可以截取若干个试样覆盖整个厚度。在这种情况下，试样在焊接接头厚度方向的位置应作标识。

2. 对接接头背弯试样

这种试样是焊缝根部为受拉面的试样，如图 7-1 和图 7-2 所示。试样厚度  $t_s$  应等于焊接接头处母材的厚度。当要求对整个厚度（30mm 以上）进行试验时，可以截取若干个试样覆盖整个厚度。在这种情况下，试样在焊接接头厚度方向的位置应作标识。

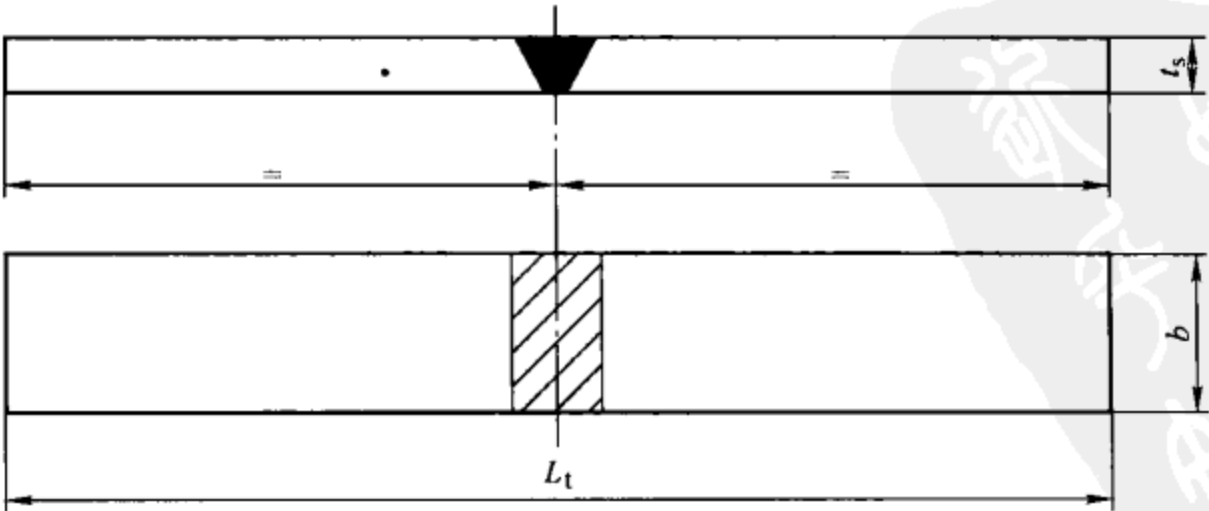


图 7-1 对接接头横向弯曲试样  
 $L_t$ —试样总长度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)



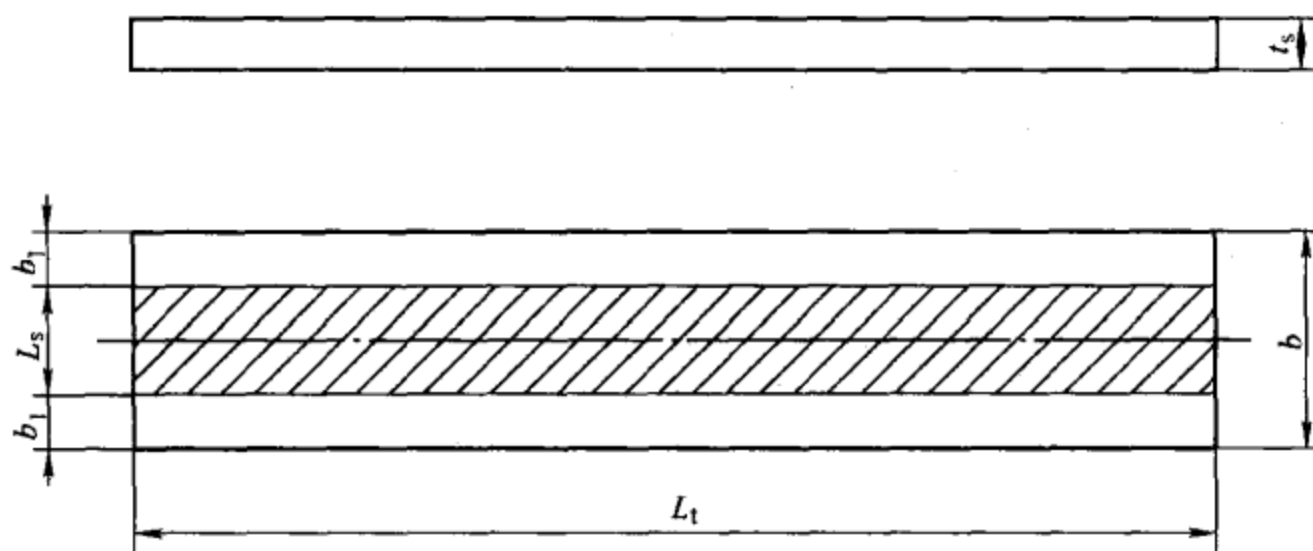


图 7-2 对接接头纵向弯曲试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $L_s$ —加工后试样上焊缝的最大宽度 (mm)

$b$ —试样宽度 (mm)  $b_1$ —熔合线外宽度 (mm)

注:  $b_1 = (b - L_s)/2$ 。

### 3. 对接接头侧弯试样

这种试样是焊缝横截面为受拉面的试样,如图 7-3 所示。试样宽度  $b$  应等于焊接接头处母材的厚度,试样厚度  $t_s$  至少应为  $(10 \pm 0.5)$  mm,而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1.5 倍。当接头厚度超过 40mm 时,允许从焊接接头截取几个试样代替一个全厚度试样,试样宽度  $b$  的范围为 20 ~ 40mm。在这种情况下,试样在焊接接头厚度方向的位置应作标识。

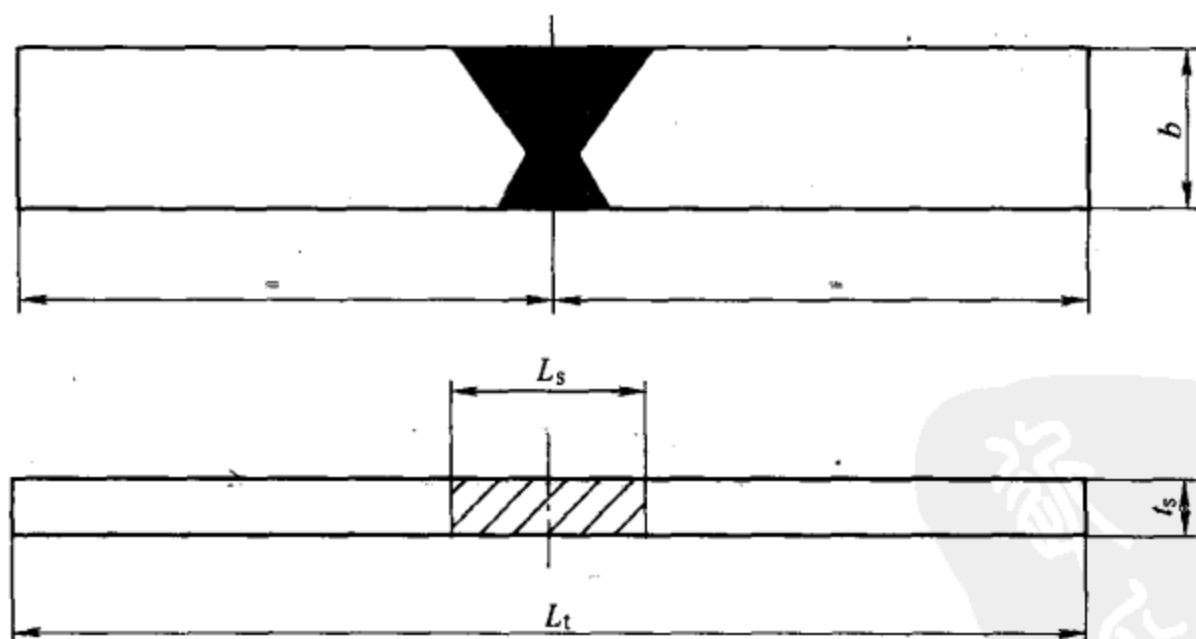


图 7-3 对接接头侧弯试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $L_s$ —加工后试样上焊缝的最大宽度 (mm)

$b$ —试样宽度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)

### 4. 带堆焊层正弯试样

这种试样是堆焊层表面为受拉面的试样,如图 7-4 所示。试样厚度  $t_s$  应等于基

材厚度加上堆焊层的厚度, 最大为 30mm。当基材厚度加上堆焊层的厚度超过 30mm 时, 允许去除部分基材, 使加工好的试样厚度  $t_s$  符合相关要求。

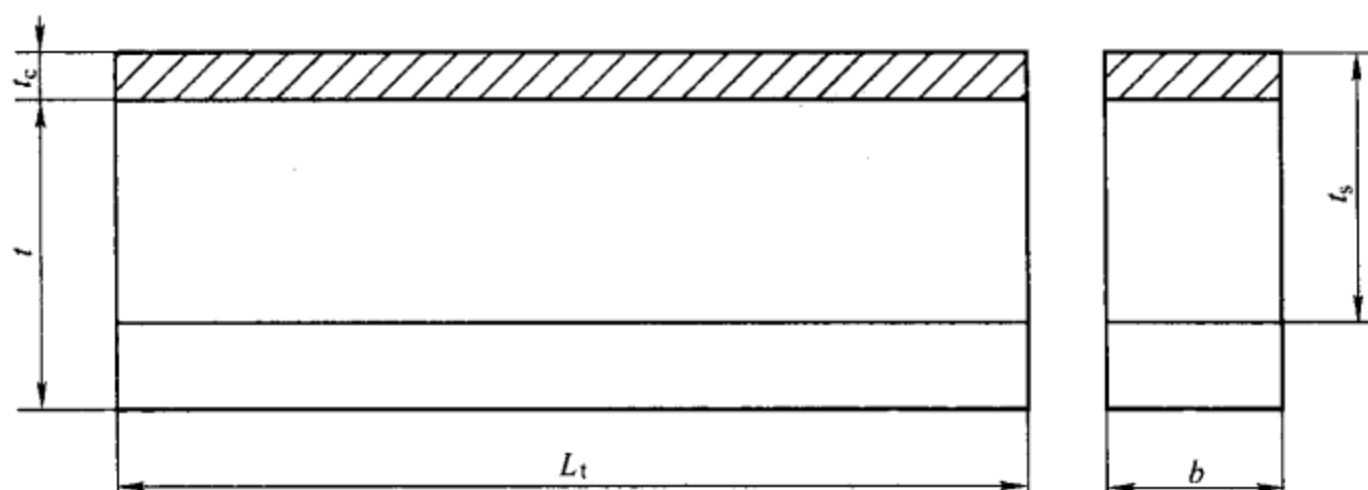


图 7-4 带堆焊层正弯试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)

$t$ —基材厚度 (mm)  $t_c$ —堆焊层厚度 (mm)

### 5. 带堆焊层侧弯试样

这种试样是堆焊层横截面为受拉面的试样, 如图 7-5 所示。试样宽度  $b$  应等于基材厚度加上堆焊层的厚度, 最大为 30mm。试样厚度  $t_s$  至少应为  $(10 \pm 0.5)$  mm, 而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1.5 倍。当基材厚度加上堆焊层的厚度超过 30mm 时, 允许去除部分母材, 使加工好的试样宽度  $b$  符合相关要求。

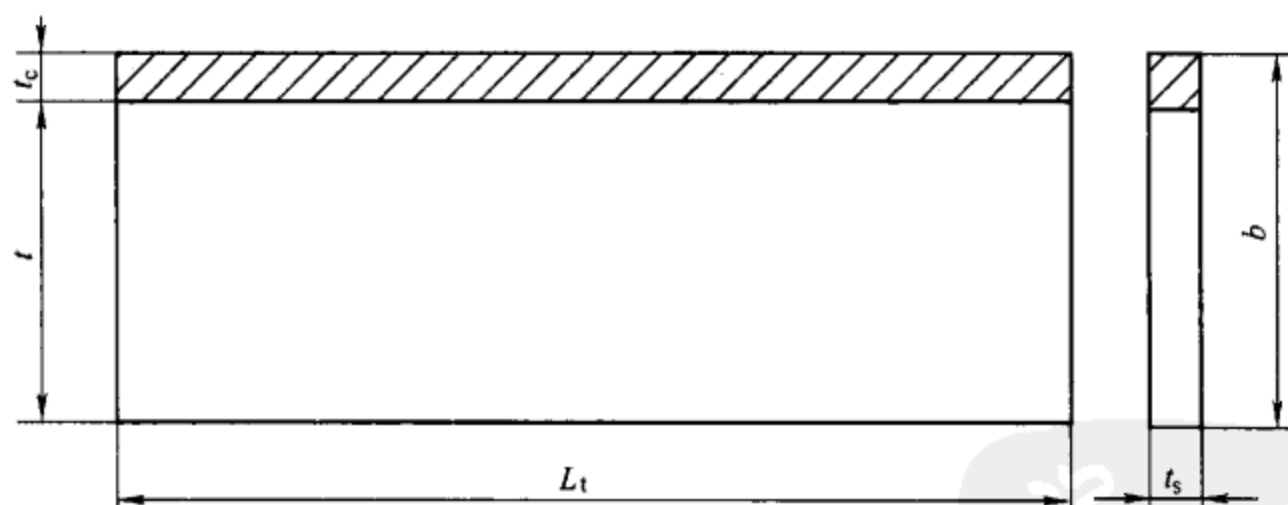


图 7-5 带堆焊层侧弯试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)

$t$ —基材厚度 (mm)  $t_c$ —堆焊层厚度 (mm)

### 6. 带堆焊层对接接头正弯试样

这种试样是对接接头堆焊层表面为受拉面的试样, 如图 7-6 所示。试样厚度  $t_s$  应等于基材厚度加上堆焊层的厚度。在这种情况下, 焊缝应位于试样的中心或适合于试验的位置。

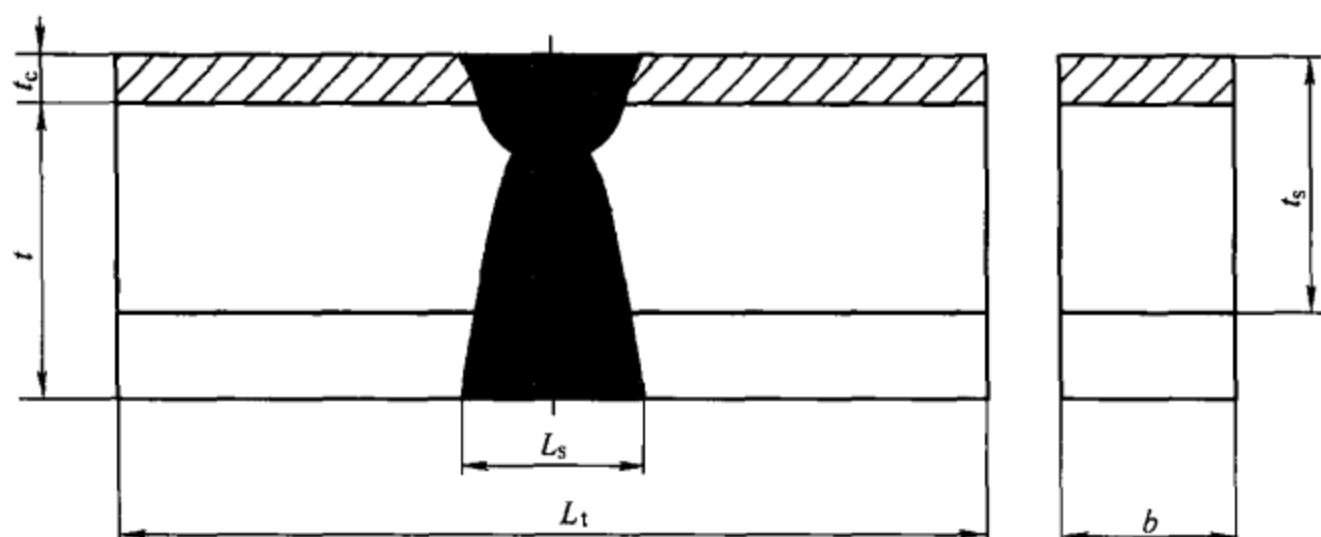


图 7-6 带堆焊层对接接头正弯试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)

$t$ —基材厚度 (mm)  $t_c$ —堆焊层厚度 (mm)

### 7. 带堆焊层对接接头侧弯试样

这种试样是对接头横截面为受拉面的试样, 如图 7-7 所示。试样宽度  $b$  应等于基材厚度加上堆焊层的厚度。试样厚度  $t_s$  至少应为  $(10 \pm 0.5)$  mm, 而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1.5 倍。在这种情况下, 焊缝应位于试样的中心或适合于试验的位置。

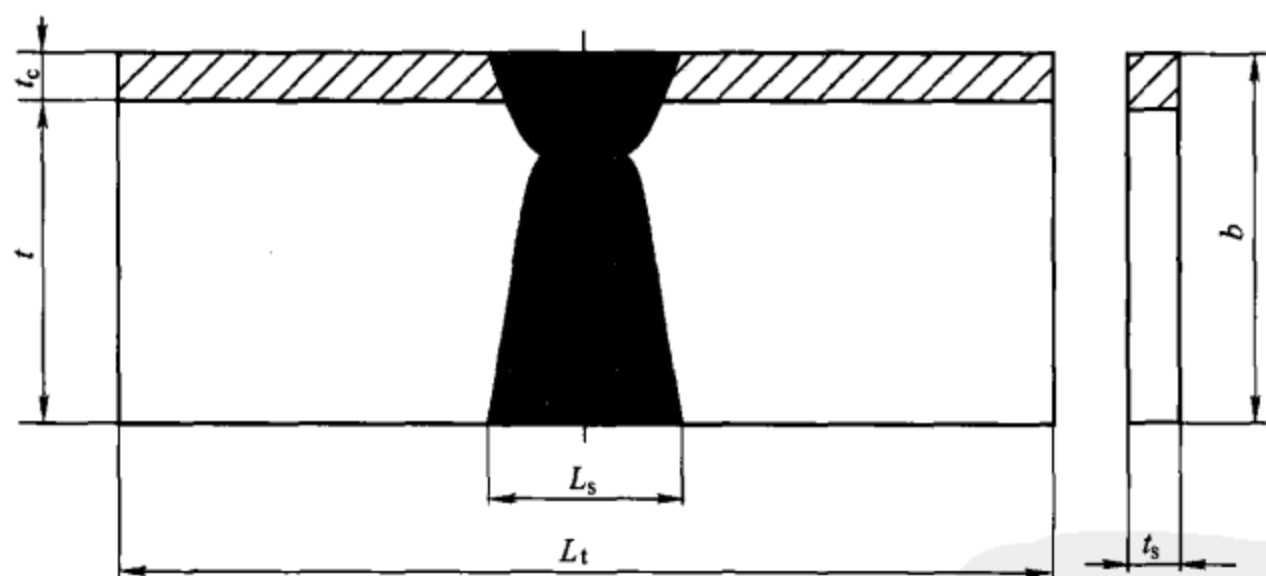


图 7-7 带堆焊层对接接头侧弯试样

$L_t$ —试样总长度 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)

$t$ —基材厚度 (mm)  $t_c$ —堆焊层厚度 (mm)

注:  $b = t + t_c$ 。

### 8. 试样的尺寸

- (1) 长度 试样的长度  $L_t$  应为  $L_t \geq 1 + 2R$ ,  $R$  为辊筒半径。
- (2) 宽度 对于横向正弯和背弯试样, 应满足下列条件:
  - 1) 钢板试样宽度  $b$  应不小于  $1.5t_s$ , 最小为 20mm。

- 2) 铝、铜及其合金板试样宽度  $b$  应不小于  $2t_s$ ，最小为 20mm。
- 3) 管径不小于 50mm 时，管试样宽度  $b$  最小应为  $t + 0.1D$  且最小为 8mm， $D$  为管外径。
- 4) 管径大于 50mm 时，管试样宽度  $b$  最小应为  $t + 0.05D$ ，最小为 8mm 且最大为 40mm。
- 5) 外径  $D$  大于  $25 \times$  管壁厚，试样的截取按板材要求。
- 6) 对于侧弯试样，试样宽度  $b$  一般等于焊接接头处母材厚度。
- 7) 对于纵向弯曲试样，试样宽度  $b$  应为  $L_s + 2b$ ，尺寸如表 7-4 所示。

表 7-4 纵向弯曲试样宽度 (单位: mm)

材 料	试样厚度 $t_s$	试样宽度 $b$
钢	$\leq 20$	$L_s + 2 \times 10$
	$> 20$	$L_s + 2 \times 15$
铝、铜及其合金	$\leq 20$	$L_s + 2 \times 15$
	$> 20$	$L_s + 2 \times 25$

(3) 棱角 试样拉伸面棱角应加工成圆角，其半径  $r$  不超过  $0.2t_s$ ，最大为 3mm。

试样加工的最后工序应采用机加工（如磨削），其目的是为了 避免材料的表面变形硬化或过热。试样表面应没有横向划痕或切痕，不得除去咬边。

7.2.5 金属线材反复弯曲试样

- 1) 线材试样应尽可能平直。但试验时，在其弯曲平面内允许有轻微的弯曲。
- 2) 必要时试样可以用手矫直。在用手不能矫直时，可在木材、塑性材料或铜的平面上用相同材料的锤头矫直。
- 3) 在矫直过程中，不得损伤线材表面，且试样也不得产生任何扭曲。
- 4) 有局部硬弯的线材应不矫直。

7.2.6 试样尺寸的测量

- 1) 圆形横截面试样应在跨距两端和中间处两个相互垂直的方向测量其直径。计算弯曲弹性模量时，取用三处直径测量值的算术平均值。计算弯曲应力时，取用中间处直径测量值的算术平均值。
- 2) 矩形横截面试样应在跨距的两端和中间处分别测量其高度和宽度。计算弯曲弹性模量时，取用三处高度测量值的算术平均值和三处宽度测量值的算术平均值。计算弯曲应力时，取用中间处测量的高度和宽度。对于薄板试样，高度测量值超过其平均值 2% 的试样不应用于试验。

3) 按表 7-5 要求选用测量工具。测量尺寸时, 应估读到最小分度的半个分度值。

表 7-5 测量工具的最小分度值 (单位: mm)

尺寸范围	测量工具最小分度值 $\leq$
0.25 ~ 1.0	0.002
> 1.0 ~ 20	0.01
> 20	0.02

## 7.3 弯曲试验设备

### 7.3.1 试验机

- 1) 各类万能试验机和压力试验机均可使用, 试验机精确度为 1 级或优于 1 级。
- 2) 试验机应能在规定的速度范围内控制试验速度, 加、卸力应平稳、无振动、无冲击。
- 3) 试验机应有三点弯曲和四点弯曲试验装置, 施力时弯曲试验装置不应发生相对移动和转动。
- 4) 试验机应配备记录弯曲力-挠度曲线的装置。

### 7.3.2 三点弯曲试验装置

1) 两支承滚柱的直径应相同, 施力滚柱的直径一般与支承滚柱的直径相同。滚柱的长度应大于试样直径或宽度。

2) 两支承滚柱的轴线应平行, 施力滚柱的轴线应与支承滚柱的轴线平行。

3) 施力滚柱的轴线至两支承滚柱的轴线的距离应相等, 偏差不大于  $\pm 0.5\%$ , 如图 7-8 所示。试验时, 力的作用方向应垂直于两支承滚柱的轴线所在平面。

4) 试验时, 滚柱应能绕其轴线转动, 但不发生相对位移。两支承滚柱间的距离应可调节, 应带有指示距离的标记, 跨距应精确到  $\pm 0.5\%$ 。

5) 滚柱的硬度应不低于试样的硬度, 其表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $0.8\mu\text{m}$ 。

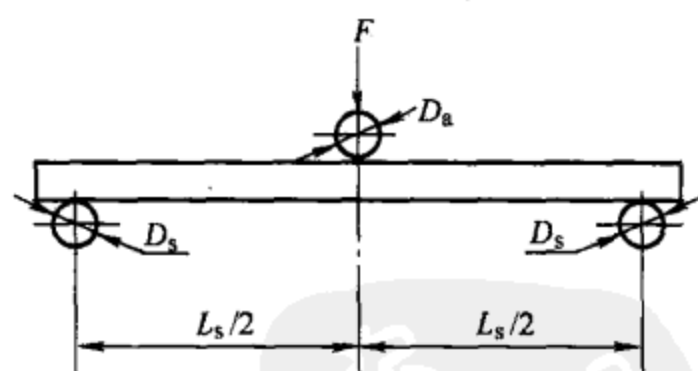


图 7-8 三点弯曲试验装置

$L_s$ —挠度计跨度 (mm)  $D_s$ —支承滚柱直径 (mm)  
 $D_a$ —施力滚柱直径 (mm)

### 7.3.3 四点弯曲试验装置

1) 两支承滚柱和两施力滚柱的直径应分别相同, 前者与后者的直径一般相

同。滚柱的长度应大于试样的直径或宽度。

2) 两支承滚柱的轴线和两施力滚柱的轴线应相互平行, 前两者所在平面应与后两者所在平面平行, 如图 7-9 所示。

3) 两力臂应相等, 且一般不小于跨距的  $1/4$ , 力臂应精确到  $\pm 0.5\%$ 。试验时, 施力滚柱的力作用方向应垂直于支承滚柱的轴线所在平面。

4) 试验时, 滚柱应能绕其轴线转动, 但不应发生相对位移。两支承滚柱间和两施力滚柱间的距离应分别可调节, 应带有指示距离的标记, 跨距应精确到  $\pm 0.5\%$ 。

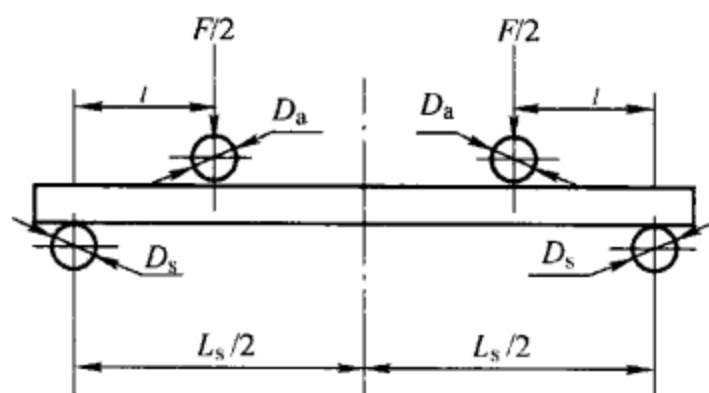


图 7-9 四点弯曲试验装置

$L_s$ —挠度计跨度 (mm)  $D_s$ —支承滚柱直径 (mm)

$D_a$ —施力滚柱直径 (mm)  $l$ —力臂 (mm)

$F$ —弯曲力 (N)

### 7.3.4 薄板试样用三点弯曲试验装置

1) 支承刀和施力刀的刀刃半径应在  $0.10 \sim 0.15\text{mm}$  范围内, 刀刃角度为  $60^\circ \pm 2^\circ$ 。其中一个支承刀刃和施力刀刃均为平直刀刃, 刀刃长度应大于试样宽度; 另一支承刀刃呈圆拱形, 其半径为  $(13 \pm 1)\text{mm}$ , 如图 7-10 所示。

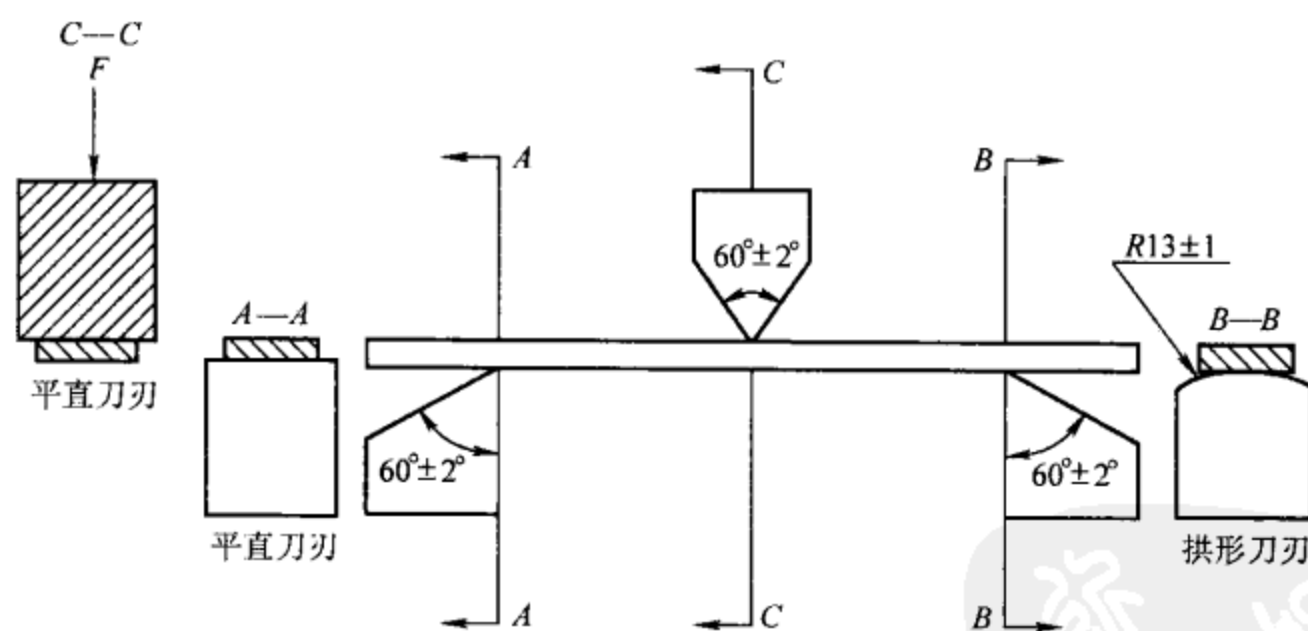


图 7-10 薄板试样用三点弯曲试验装置

2) 施力刀的刃线应平行于支承刀的刃线及支承刀的刃线与另一支承点所在平面。施力刀刃的力作用方向应垂直于支承刀的刃线与另一支承点所在平面。

3) 施力刀刃应位于两支承刀刃间的中点, 偏差不大于  $\pm 0.5\%$ 。两支承刀刃之间的距离应可调节, 应带有指示距离的标记, 跨距应精确到  $\pm 0.5\%$ 。

4) 支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度, 刀刃表面应光滑。



7.3.5 薄板试样用四点弯曲试验装置

1) 两支承刀和两施力刀的刀刃半径应在 0.10 ~ 0.15mm 范围内, 刀刃角度为  $60^{\circ} \pm 2^{\circ}$ 。其中一施力刀刃呈圆拱形, 其半径应为  $(13 \pm 1)\text{mm}$ , 其余刀刃均为平直刀刃, 其刃线的长度应大于试样宽度, 如图 7-11 所示。

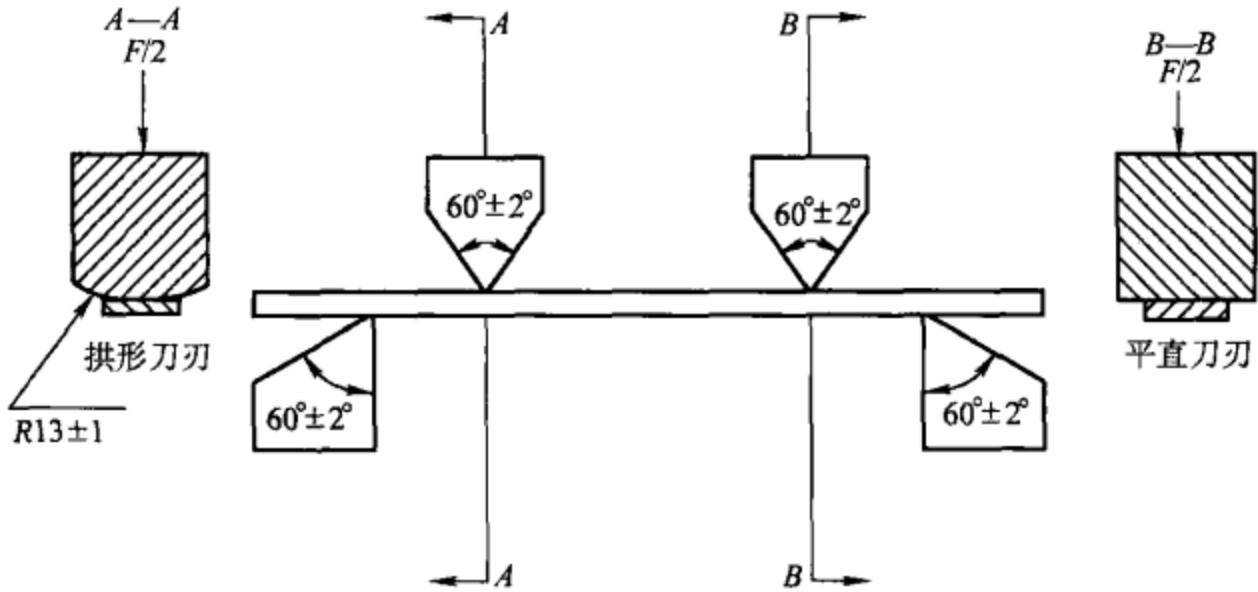


图 7-11 薄板试样用四点弯曲试验装置

- 2) 两支承刀的刃线和平直施力刀的刃线应相互平行。平直施力刀的刃线和拱形刀刃的施力点所在平面应平行于两支承刀的刃线所在平面。两力臂应相等, 且一般不小于跨距的 1/6。力臂应精确到  $\pm 0.5\%$ , 试验时, 施力刀刃的力作用方向应垂直于两支承刀的刃线所在平面。
- 3) 两施力刀刃间和两支承刀刃间的距离均应可调节, 应带有指示距离的标记, 跨距应精确到  $\pm 0.5\%$ 。
- 4) 支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度, 刀刃表面应光滑。

7.3.6 挠度计

1) 应根据所测性能按表 7-6 选用挠度计。

表 7-6 挠度计的选择

性 能	规定非比例弯曲应变(%)	允许挠度计位移示值相对误差(%)
$E_b$		$\pm 0.3$
$\sigma_{pb}, \sigma_{rb}$	$< 0.05$	$\pm 0.3$
	$0.05 \sim 0.2$	$\pm 0.5$
	$> 0.2$	$\pm 1.0$
$U, f_{bb}$		$\pm 1.0$

2) 挠度计跨距与其标称值之差应不大于  $\pm 0.5\%$ 。

3) 采用挠度计测量试样挠度时, 挠度计对试样产生的附加弯曲力应尽可能小, 一般不大于试验中所施加弯曲力的  $0.05\%$ 。

### 7.3.7 金属管弯曲试验设备

金属管弯曲试验应在弯管试验机上进行, 试验时试验机应能防止金属管的横截面产生椭圆变形。弯管试验机的弯心应具有与金属管外径轮廓相适应的沟槽。

### 7.3.8 V 形模具式弯曲装置

V 形模具式弯曲装置如图 7-12 所示, 模具 V 形槽的角度应为  $180^\circ - \alpha$ , 弯曲角度应在相关产品标准中规定。弯曲压头的圆角半径为  $d/2$ 。模具的支承棱边应倒圆, 其倒圆半径应为  $1 \sim 10$  倍试样厚度。模具和弯曲压头宽度应大于试样宽度或直径, 弯曲压头应具有足够的硬度。

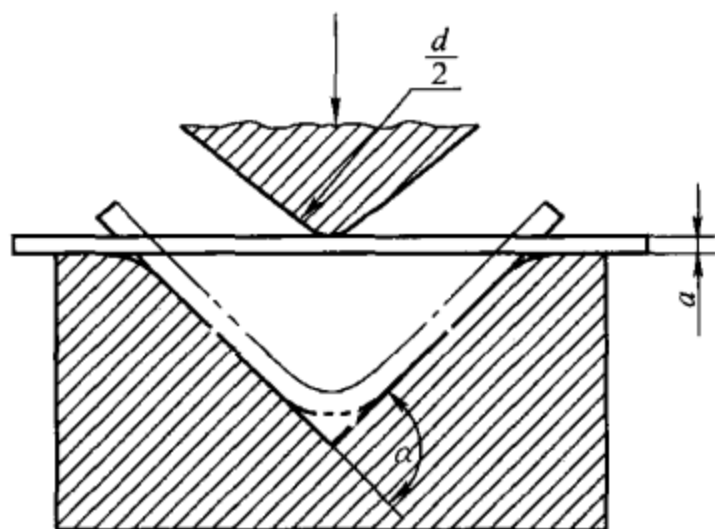


图 7-12 V 形模具式弯曲装置

$d$ —弯曲压头或弯心直径 (mm)  $a$ —试样厚度 (mm)  
 $\alpha$ —弯曲角度 ( $^\circ$ )

### 7.3.9 台虎钳式弯曲装置

台虎钳式弯曲装置由台虎钳配备足够硬度的弯心组成, 如图 7-13 所示。可以配置加力杠杆。弯心直径应按照相关产品标准要求, 弯心宽度应大于试样宽度或直径。

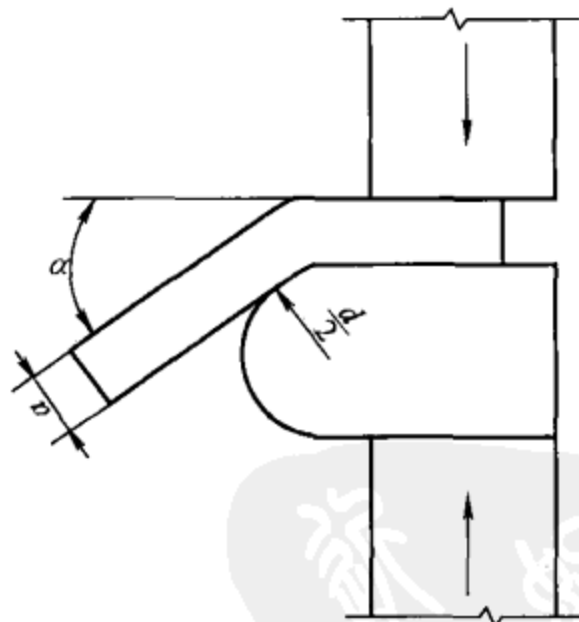


图 7-13 台虎钳式弯曲装置

$d$ —弯曲压头或弯心直径 (mm)  $a$ —试样厚度 (mm)  
 $\alpha$ —弯曲角度 ( $^\circ$ )

### 7.3.10 翻板式弯曲装置

翻板式弯曲装置如图 7-14 所示。

1) 翻板带有楔形滑块, 滑块宽度应大于试样宽度或直径。滑块应具有足够的硬度, 翻板固定在耳轴上, 试验时能绕耳轴轴线转动。耳轴连接弯曲角度指示器, 指示  $0^\circ \sim 180^\circ$  的弯曲角度。

2) 翻板间距离 ( $l$ ) 应为两翻板的试样支承面同时垂直于水平轴线时两支承面间的距离, 如图 7-14c 所示,  $l = d + 2a + (2 \sim 6) \text{ mm}$ 。

3) 弯曲压头直径应在相关产品标准中规定, 弯曲压头宽度大于试样宽度或

直径，弯曲压头的压杆厚度应略小于弯曲压头直径，弯曲压头应具有足够的硬度。

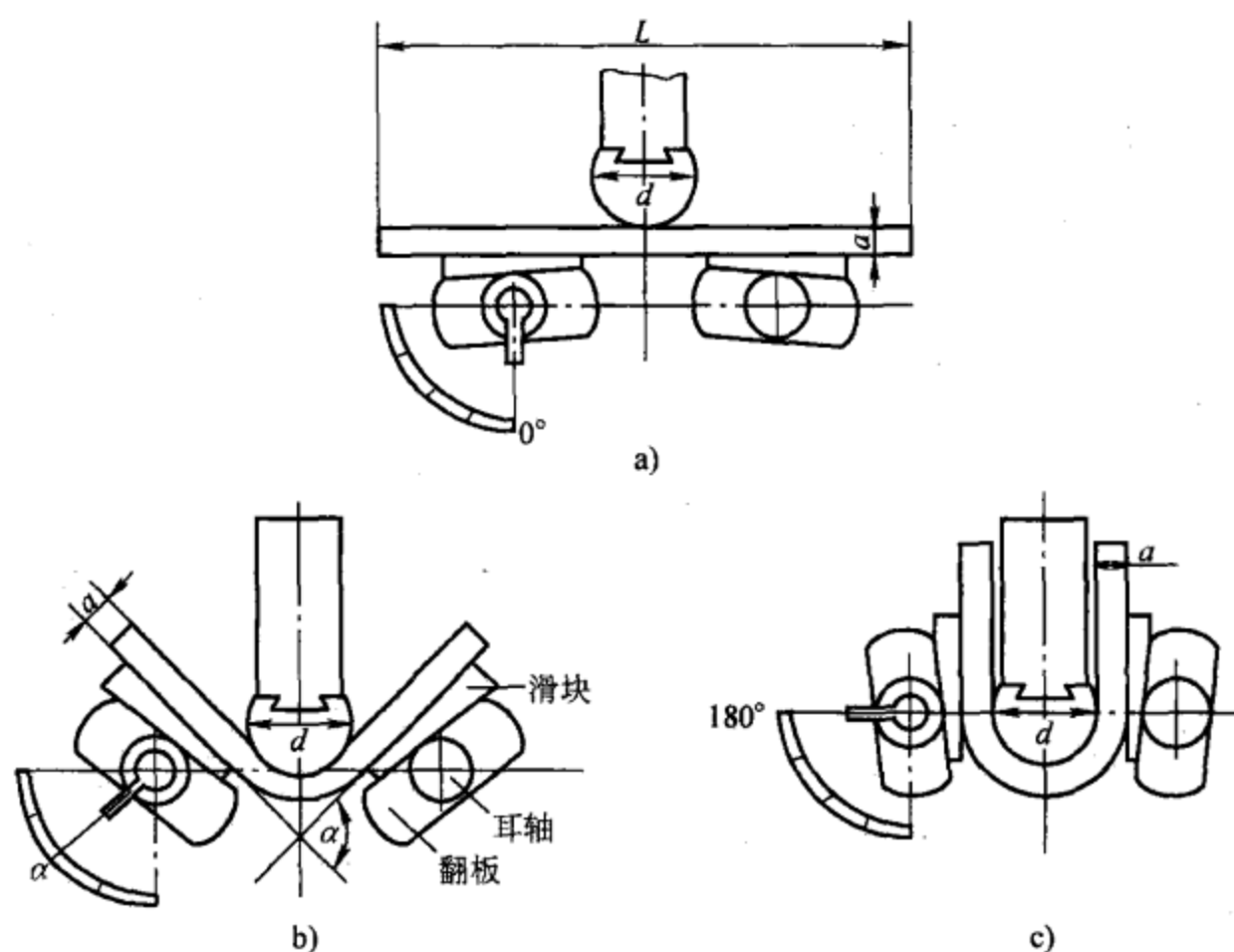


图 7-14 翻板式弯曲装置

a) 弯曲前 b) 弯曲过程中 c) 弯曲后

$d$ —弯曲压头或弯心直径 (mm)  $a$ —试样厚度 (mm)  $\alpha$ —弯曲角度 ( $^{\circ}$ )

$L$ —试样长度 (mm)

### 7.3.11 金属线材反复弯曲试验设备

1) 试验机的工作原理如图 7-15 所示。

2) 圆柱支座和夹持块应有足够的硬度（以保证其刚度和耐磨性），圆柱支座半径不得超出表 7-7 给出的公称尺寸允许偏差。圆柱支座轴线应垂直于弯曲平面并相互平行，而且在同一平面内，偏差不得超过 0.1mm。夹块的夹持面应稍突出于圆柱支座但不超过 0.1mm，即测量两圆柱支座的曲率中心连线上试样与圆柱支座间的间隔不大于 0.1mm。夹块的顶面应低于两圆柱支座曲率中心连线。如图 7-15 所示，当圆柱支座半径等于或小于 2.5mm 时， $y$  值为 1.5mm；当圆柱支座半径大于 2.5mm 时， $y$  值为 3mm。

### 7.3.12 热双金属弯曲试验装置

#### 1. 热双金属比弯曲试验装置

1) 试验装置由测挠仪、恒温浴槽和高灵敏电子接触指示器组成。

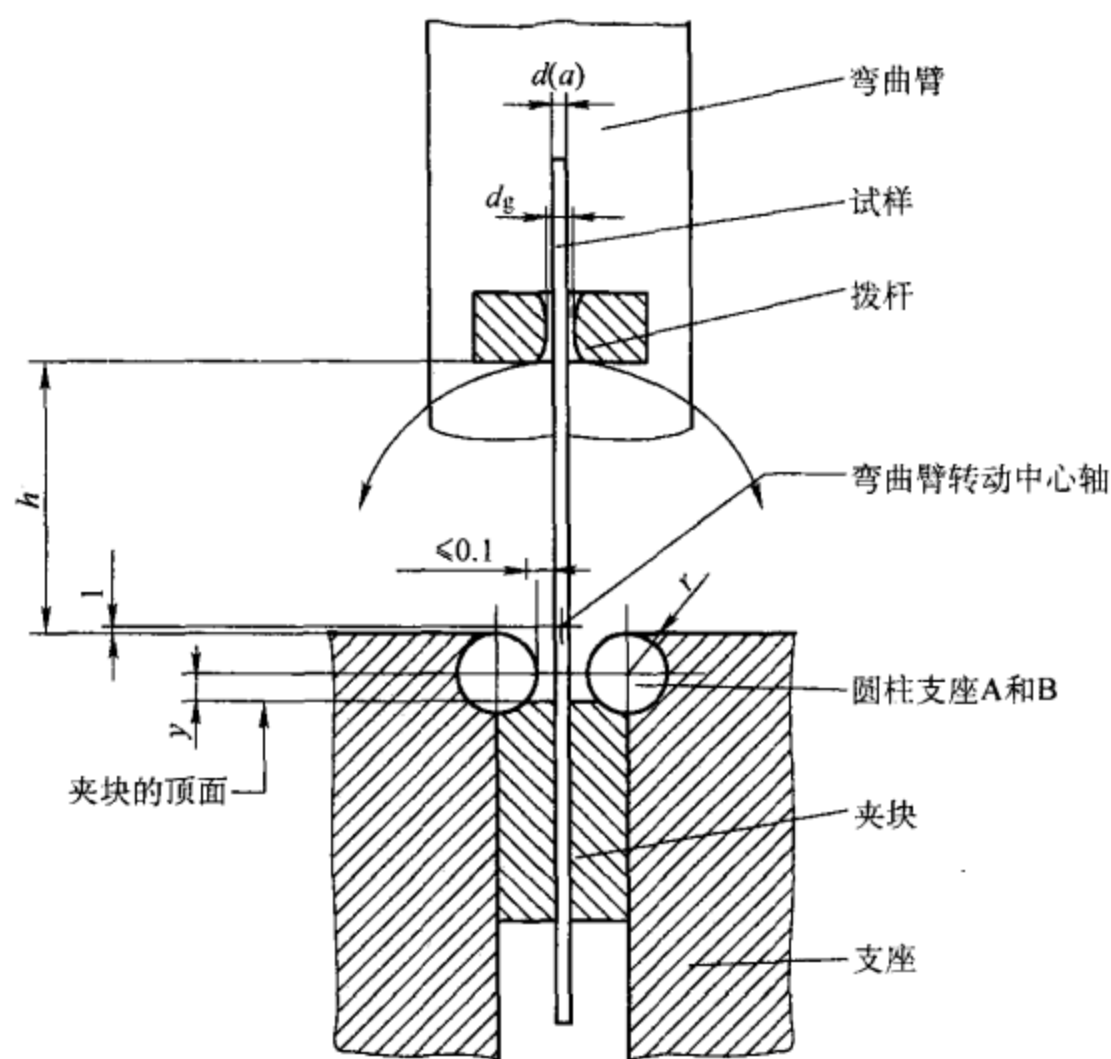


图 7-15 试验机的工作原理

$h$ —圆柱支座顶部至拨杆底部距离 (mm)  $r$ —圆柱支座半径 (mm)  
 $y$ —两圆柱支座轴线所在平面与试样最近接触点的距离 (mm)  $d_g$ —拨杆孔直径 (mm)  
 $d$ —圆金属线材直径 (mm)  $a$ —装在两平行夹具间的非圆截面试样最小厚度 (mm)

表 7-7 支座及拨杆孔的要求 (单位: mm)

线材公称直径或厚度 $d(a)$	圆柱支座半径 $r$	距离 $h$	拨杆孔直径 $d_g$ ①
$0.3 \leq d(a) \leq 0.5$	$1.25 \pm 0.05$	15	2.0
$0.5 < d(a) \leq 0.7$	$1.75 \pm 0.05$	15	2.0
$0.7 < d(a) \leq 1.0$	$2.5 \pm 0.1$	15	2.0
$1.0 < d(a) \leq 1.5$	$3.75 \pm 0.1$	20	2.0
$1.5 < d(a) \leq 2.0$	$5.0 \pm 0.1$	20	2.0 和 2.5
$2.0 < d(a) \leq 3.0$	$7.5 \pm 0.1$	25	2.5 和 3.5
$3.0 < d(a) \leq 4.0$	$10 \pm 0.1$	35	3.5 和 4.5
$4.0 < d(a) \leq 6.0$	$15 \pm 0.1$	50	4.5 和 7.0
$6.0 < d(a) \leq 8.0$	$20 \pm 0.1$	75	7.0 和 9.0
$8.0 < d(a) \leq 10.0$	$25 \pm 0.1$	100	9.0 和 11.0

① 较小的拨杆孔直径适用于较细公称直径的线材 (见第 1 列), 而较大的拨杆孔直径适用于较粗公称直径的线材 (也见第 1 列)。对于在第 1 列所列范围直径, 应选择合适的拨杆孔直径以保证线材在孔内自由运动。

2) 高灵敏电子接触指示器可迅速准确地判别是测量杆本身还是其尖端与试样表面接触, 并发出信号。

3) 测挠仪由 4J36 低膨胀合金制成的试样夹持器、支架、测量杆及测微头和温度计构成。

4) 试样夹持器将试样一端夹紧, 另一端自由, 呈水平状态。

5) 支架用于支撑、固定试样夹持器和测量杆, 以避免测量过程中测量杆中心与试样夹持器端面之间的测量长度发生变化。

6) 温度测量装置采用二等标准水银温度计或相等精度的温度计测定浴槽内各点温度, 试样温度的测定应精确至  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

7) 浴槽是一种能搅拌的恒温箱或恒温液槽。浴槽中可放置试样架和可调节的加热电源, 利用可调节的加热电源, 使试样能保持在要求的温度下, 沿整个试样长度上的温度差异不超过试验所用温度范围的 0.5%, 在整个试验过程中浴槽的温度变化在  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  之内。浴槽宜用甲基硅油作介质, 试样夹持器放置在浴槽内后, 应保证试样浸入深度不小于 80mm。

## 2. 热双金属温曲率试验装置

1) 支座包括一个刀刃支座和一个半径不大于 0.2mm 的点状支座, 如图 7-16 所示。测量长度  $L$  (试样与一个支座接触的点 to 另一个支座接触的点之间的距离) 必须精确到 0.1mm。当温度在  $20 \sim 130^{\circ}\text{C}$  时, 测量距离  $L$  的变化应小于 0.05mm。因此, 有关支座的连接部件必须采用热膨胀系数小的 4J36 材料制成。接触杆位于两支座中心, 其误差小于  $\pm 0.05\text{mm}$ 。

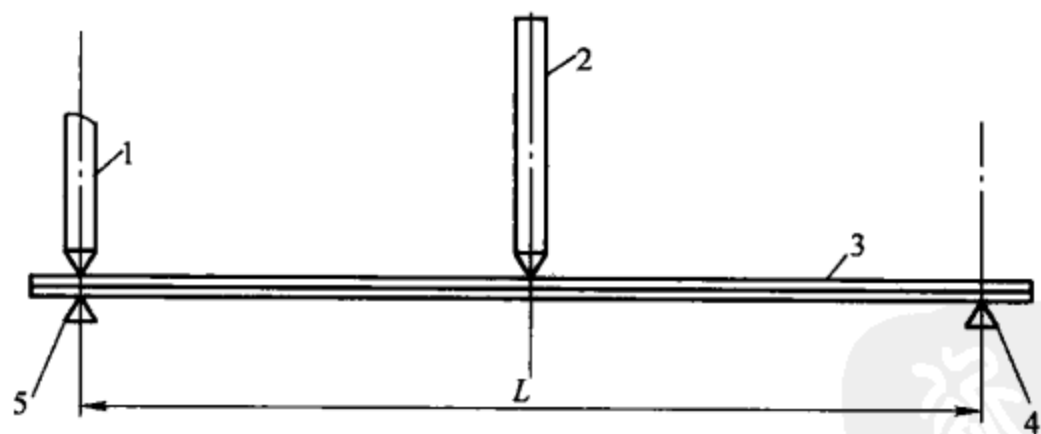


图 7-16 热双金属温曲率试验装置

1—压持器 2—接触杆 3—试样 4—点状支座 5—刃状支座  $L$ —测量长度

2) 为了防止试样在测量过程中移动, 必须采用压持器。在刀刃支座的一端, 用一点状载荷杆在垂直方向上施加 0.25N 的重力, 把试样固定, 如图 7-17 所示。为了限制试样横向移动, 要求图 7-17 中尺寸  $B$  不得比试样宽度大 0.5mm 以上。

3) 使用深度千分尺或读数显微镜测量试样的挠度, 要求从垂直由两个支座所

组成的水平方向去接触试样。在使用深度千分尺时,用电子指示器接触不会对试样带来较大的影响,要求在各个试验温度下,试样挠度的测量能精确至0.01mm。挠度测量装置与试样支座相连接的部分应采用热膨胀系数小的4J36材料制成,以避免加热时测量装置与试样支座产生明显的位移。

4) 浴槽与测量热双金属比弯曲所用装置相同。

### 3. 热双金属弯曲常数试验

1) 热双金属弯曲常数试验方法采用悬臂梁法,由试样夹具、试样、电子指示器及位移测量装置组成一个闭合电路。室温时调整测量位移装置的测量微器、测杆与试样面自由端接触,电子指示器发出信号,利用曲率随温度变化的试样作为闭合电路的开关,来测量试样自由端的挠度变化。

2) 试样夹持应能将平直金属板一端夹紧,呈水平状态。

3) 支架用于支撑、固定试样夹具和测量杆,以避免测量过程中测量杆中心与试样夹持端面之间的测量长度发生变化。

4) 位移测量装置由测微器和测杆组成,最小分度值不大于0.001mm。

5) 高灵敏度电子指示器用来判断测量杆和试样表面的接触,测杆与试样表面接触时,能迅速准确的发出信号。

6) 温度测量装置、浴槽与测量热双金属比弯曲所用装置相同。

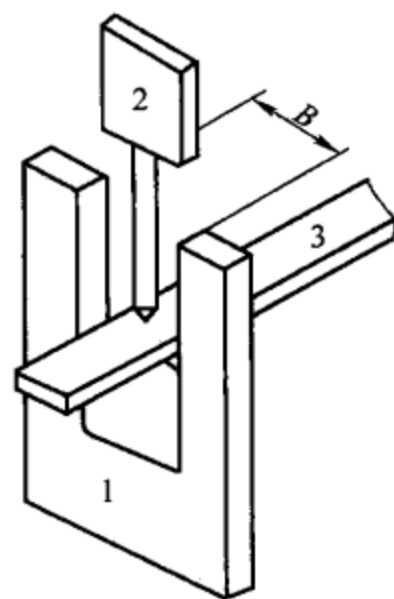


图 7-17 压持器

1—刀状支座 2—带负荷的压持器  
3—试样 B—间隔距离

## 7.4 试验要求

1) 试验一般在10~35℃的温度范围内进行。对温度要求严格的试验,试验温度应为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

2) 弯曲试验时,应缓慢施加弯曲力。

3) 试验时,弯曲应力增加速率应控制在 $3 \sim 30\text{N/mm}^2$ 范围内某个尽量恒定的值。

4) 通过弯管试验机将不带填充物的管试样弯曲。试验时,应确保试样弯曲变形段与金属管弯心紧密接触,直至达到规定的弯曲角度。

5) 在进行焊接管的弯曲试验时,焊缝相对于弯曲平面的位置应符合相关产品标准规定的要求。如果未规定具体要求,焊缝应置于与弯曲平面呈 $90^\circ$ （即弯曲中性线）的位置。



## 7.5 弯曲性能的测定

### 7.5.1 弯曲弹性模量的测定

#### 1. 人工记录方法

将挠度计装于测量位置上, 试样对称地安放于弯曲试验装置。对试样施加相当于规定非比例弯曲应力  $\sigma_{pb0.01}$  (或规定残余弯曲应力  $\sigma_{rb0.01}$ ) 10% 以下的预弯曲力  $F_0$ , 并记录此力和跨距中点处的挠度  $f$ , 然后对试样连续施加弯曲力  $F$ , 直至相应于  $\sigma_{pb0.01}$  (或  $\sigma_{rb0.01}$ ) 的 50%。记录弯曲力的增量  $\Delta F$  和相应挠度的增量  $\Delta f$ 。三点弯曲试验时, 按下式计算弯曲弹性模量:

$$E_b = \frac{L_s^3}{48I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right)$$

式中  $E_b$ ——弯曲弹性模量, 单位为  $N/mm^2$ ;

$L_s$ ——跨距, 单位为  $mm$ ;

$\Delta F$ ——弯曲力增量, 单位为  $N$ ;

$\Delta f$ ——挠度增量, 单位为  $mm$ ;

$I$ ——试样截面惯性矩, 单位为  $mm^4$ 。

四点弯曲试验时, 按下式计算弯曲弹性模量:

$$E_b = \frac{l(3L_s^2 - 4l^2)}{48I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right)$$

式中  $E_b$ ——弯曲弹性模量, 单位为  $N/mm^2$ ;

$L_s$ ——跨距, 单位为  $mm$ ;

$\Delta F$ ——弯曲力增量, 单位为  $N$ ;

$\Delta f$ ——挠度增量, 单位为  $mm$ ;

$l$ ——力臂, 单位为  $mm$ ;

$I$ ——试样截面惯性矩, 单位为  $mm^4$ , 对于圆形横截面试样, 按下式计算:

$$I = \frac{1}{64} \pi d^4$$

对于矩形横截面试样, 按下式计算:

$$I = \frac{1}{12} b h^3$$

式中  $d$ ——试样直径, 单位为  $mm$ ;

$b$ ——试样宽度, 单位为  $mm$ ;

$h$ ——试样高度, 单位为  $mm$ 。

## 2. 图解法

将挠度计装于测量位置上，挠度计跨距的端点与最邻近支承点或施力点的距离应不小于试样的高度或直径。试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，同时采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线，直至超过相应于  $\sigma_{pb0.01}$ （或  $\sigma_{rb0.01}$ ）的弯曲力。记录时，建议力轴比例和挠度轴放大倍数的选择，应使曲线弹性直线段与力轴的夹角不小于  $40^\circ$ ，弹性直线段的高度应超过力轴量程的  $3/5$ 。在记录的曲线图上，借助于直尺的直边确定最佳弹性直线段，读取该直线段的弯曲力增量（ $\Delta F$ ）和相应的挠度增量（ $\Delta f$ ），如图 7-18 所示。

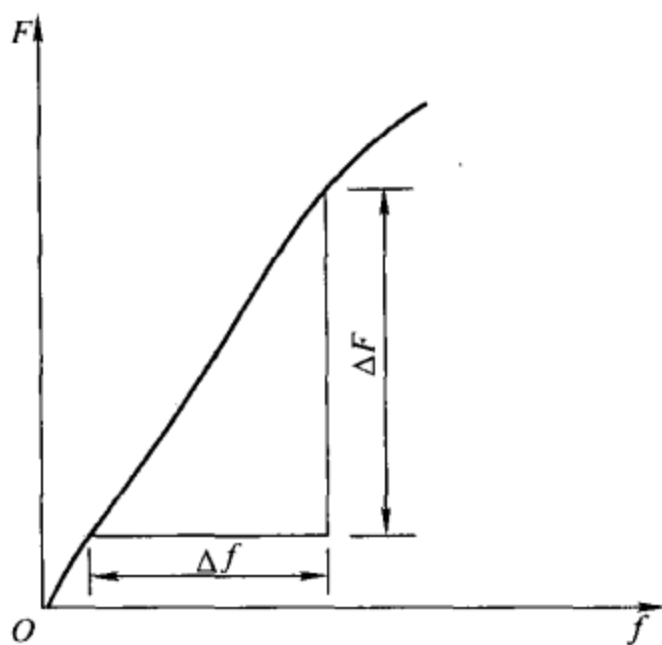


图 7-18 图解法测定弯曲弹性模量

三点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_b = \frac{L_s^2 (3L_s - L_e)}{96I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right)$$

式中  $E_b$ ——弯曲弹性模量，单位为  $\text{N/mm}^2$ ；

$L_s$ ——跨距，单位为  $\text{mm}$ ；

$L_e$ ——挠度计跨距，单位为  $\text{mm}$ ；

$\Delta F$ ——弯曲力增量，单位为  $\text{N}$ ；

$\Delta f$ ——挠度增量，单位为  $\text{mm}$ ；

$I$ ——试样截面惯性矩，单位为  $\text{mm}^4$ 。

四点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_b = \frac{lL_e^2}{16I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right)$$

式中  $E_b$ ——弯曲弹性模量，单位为  $\text{N/mm}^2$ ；

$l$ ——力臂，单位为  $\text{mm}$ ；

$L_e$ ——挠度计跨距，单位为  $\text{mm}$ ；

$\Delta F$ ——弯曲力增量，单位为  $\text{N}$ ；

$\Delta f$ ——挠度增量，单位为  $\text{mm}$ ；

$I$ ——试样截面惯性矩，单位为  $\text{mm}^4$ 。

### 7.5.2 规定非比例弯曲应力的测定

安装好挠度计，将试样对称地安放于弯曲试验装置上。对试样连续施加弯曲

力, 采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线。记录时, 力轴每 1mm 所代表的应力应不大于  $15\text{N/mm}^2$ , 并使曲线上所测规定非比例弯曲力  $F_{pb}$  处于力轴量程的  $1/2$  以上。挠度放大倍数的选择应使图 7-19 曲线图上的  $OC$  段长度不小于 15mm。在记录的曲线图上, 自弹性直线段与挠度轴的交点  $O$  起, 截取相应于规定非比例弯曲应变的  $OC$  段。过  $C$  点作弹性直线段的平行线  $CA$  交曲线于  $A$  点,  $A$  点所对应的力为所测规定非比例弯曲力  $F_{pb}$ , 如图 7-19 所示。

规定非比例弯曲应力按下式计算:

$$\sigma_{pb} = \frac{F_{pb} l}{2W}$$

式中  $\sigma_{pb}$ ——规定非比例弯曲应力, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$F_{pb}$ ——规定非比例弯曲力, 单位为  $\text{N}$ ;

$l$ ——力臂, 单位为  $\text{mm}$ ;

$W$ ——试样截面系数, 单位为  $\text{mm}^3$ , 对于圆形横截面试样, 按下式计算:

$$W = \frac{1}{32} \pi d^3$$

对于矩形横截面试样, 按下式计算:

$$W = \frac{1}{6} b h^2$$

式中  $d$ ——试样直径, 单位为  $\text{mm}$ ;

$b$ ——试样宽度, 单位为  $\text{mm}$ ;

$h$ ——试样高度, 单位为  $\text{mm}$ 。

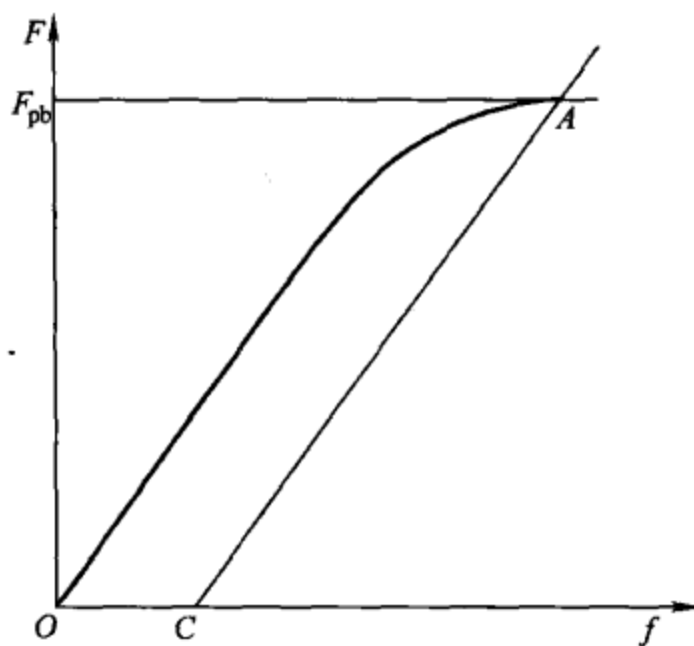


图 7-19 图解法测定规定非比例弯曲应力

### 7.5.3 规定残余弯曲应力的测定

1) 将试样对称地安放于弯曲试验装置上, 并对其施加相应于预期或规定残余弯曲应力  $\sigma_{rb0.01}$  的 10% 的预弯曲力  $F_0$ 。测量跨距中点的挠度, 记取此时挠度计的读数作为零点。对试样连续或分级施加弯曲力, 并将其卸除至预弯曲力  $F_0$ , 测量残余挠度  $f_{rb}$ 。反复递增施力和卸力, 直至测量的残余挠度达到或稍超过规定残余弯曲应变相应的挠度。

2) 按下式计算规定残余弯曲力:

$$F_{rb} = F_{n-1} + \left( \frac{F_n - F_{n-1}}{f_n - f_{n-1}} \right) (f_{rb} - f_{n-1})$$

式中  $F_{rb}$ ——规定残余弯曲力，单位为 N；

$F_{n-1}$ ——最后前一次施加的弯曲力，单位为 N；

$F_n$ ——最后一次施加的弯曲力，单位为 N；

$f_n$ ——最后一次施力并将其卸除后的残余挠度，单位为 mm；

$f_{n-1}$ ——最后前一次施力并将其卸除后的残余挠度，单位为 mm；

$f_{rb}$ ——达到规定残余弯曲应变时的残余挠度，单位为 mm，三点弯曲试验时，按下式计算：

$$f_{rb} = \frac{L_s^2}{12Y} \varepsilon_{rb}$$

四点弯曲试验时，按下式计算：

$$f_{rb} = \frac{3L_s^2 - 4l^2}{24Y} \varepsilon_{rb}$$

式中  $l$ ——力臂，单位为 mm；

$L_s$ ——跨距，单位为 mm；

$\varepsilon_{rb}$ ——规定残余弯曲应变（%）；

$Y$ ——试样宽度系数，对于圆形横截面试样  $Y = d/2$ ，对于矩形横截面试样， $Y = h/2$ 。

3) 三点弯曲试验的规定残余弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_{rb} = \frac{F_{rb} L_s}{4W}$$

四点弯曲试验的规定残余弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_{rb} = \frac{F_{rb} l}{2W}$$

式中  $L_s$ ——跨距，单位为 mm；

$l$ ——力臂，单位为 mm；

$W$ ——试样截面系数，单位为 mm<sup>3</sup>。

#### 7.5.4 抗弯强度的测定

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，直至试样断裂。从试验机测力度盘上或从记录的弯曲力-挠度曲线上读取最大弯曲力  $F_{bb}$ ，三点弯曲试验时按下式计算抗弯强度：

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} L_s}{4W}$$

四点弯曲试验时按下计算抗弯强度：

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} l}{2W}$$

式中  $F_{bb}$ ——最大弯曲力，单位为 N；  
 $L_s$ ——跨距，单位为 mm；  
 $l$ ——力臂，单位为 mm；  
 $W$ ——试样截面系数，单位为 mm<sup>3</sup>。

7.5.5 断裂挠度的测定

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，直至试样断裂。测量试样断裂瞬间跨距中点的挠度，此挠度即为断裂挠度  $f_{bb}$ ，单位为 mm。

测定断裂挠度一般可与测定抗弯强度在同一试验中进行。可以利用试验机横梁位移来测定断裂挠度，但应修正试验机柔性等因素的影响。

7.5.6 弯曲断裂能量的测定

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力。测量试样在跨距中点的挠度，用自动方法连续记录弯曲力-挠度 ( $F$ - $f$ ) 曲线，直至试样断裂，如图 7-20 所示。

在记录的曲线图上，用面积仪或其他方法求得弯曲力-挠度曲线下的面积  $S$ ，精确到  $\pm 2\%$ 。按下式计算弯曲断裂能量：

$$U = \frac{ZS}{n} \times 10^{-3}$$

式中  $U$ ——弯曲断裂能量，单位为 J；  
 $Z$ ——力轴每毫米代表的力值，单位为 N/mm；  
 $S$ ——弯曲试验曲线下包围的面积，单位为 mm<sup>2</sup>。

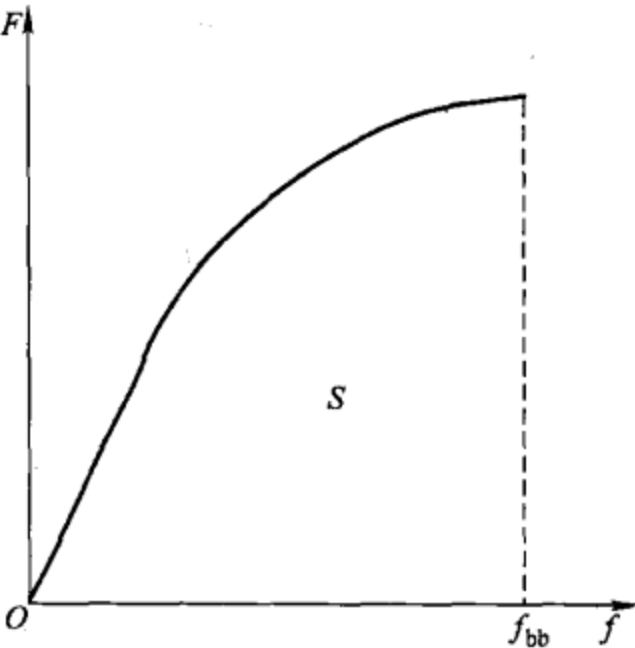


图 7-20 图解法测定弯曲断裂能量

7.5.7 测试结果数值的修约

测试结果的数值应按表 7-8 进行修约，修约的方法采用 GB/T 8170—2008 《数值修约规则与极限数值的表示和判定》。

表 7-8 测试结果的数值修约

性 能	范 围	修 约 到
$E_b/(N/mm^2)$	$\leq 150000$	500
	$> 150000$	1000

(续)

性 能	范 围	修 约 到
$\sigma_{pb}, \sigma_{tb}, \sigma_{bb}/(N/mm^2)$	$\leq 200$	1
	$> 200 \sim 1000$	5
	$> 1000$	10
$f_{bb}/mm$		0.1
$U/J$	$< 10$	0.05
	$\geq 10$	0.1

7.5.8 金属管弯曲性能的测定

1) 将一根全截面的金属直管绕着一个规定半径和带槽的弯心弯曲，直至弯曲角度达到相关产品标准所规定的值，如图 7-21 所示。

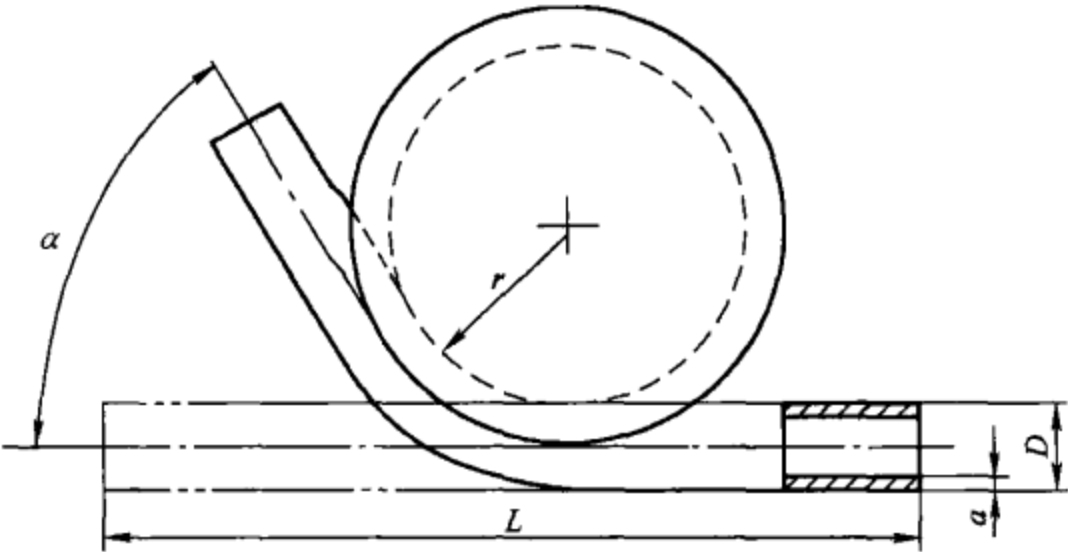


图 7-21 金属管弯曲性能的测定试验原理

$L$ —试样原始长度 (mm)  $D$ —金属管原始外径 (mm)  
 $\alpha$ —弯曲角度 (°)  $a$ —管壁厚度 (mm)  $r$ —弯心半径 (mm)

2) 通过弯管试验机将不带填充物的管试样弯曲，试验时应确保试样弯曲变形段与金属管弯心紧密接触，直至达到规定的弯曲角度。

3) 在进行焊接管的弯曲试验时，焊缝相对于弯曲平面的位置应符合相关产品标准规定的求。如果未规定具体要求，焊缝应置于与弯曲平面呈 90°（即弯曲中性线）的位置。

7.5.9 金属线材反复弯曲性能测定

1) 使弯曲臂处于垂直位置，将试样由拨杆孔插入，试样下端用夹块夹紧，并使试样垂直于圆柱支座轴线。非圆形试样的夹持，应使其较大尺寸平行于或近似平行于夹持面，如图 7-22 所示。



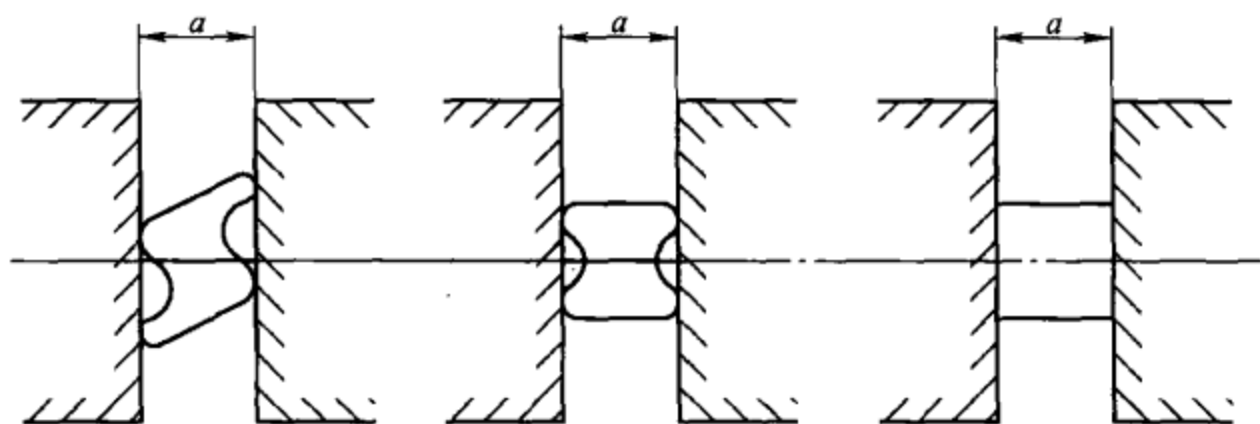


图 7-22 非圆形试样的夹持

$a$ —装在两平行夹具间的非圆截面试样最小厚度 (mm)

2) 弯曲试验是将试样弯曲  $90^\circ$ ，再向相反方向交替进行。将试样自由端弯曲  $90^\circ$ ，再返回至起始位置作为第一次弯曲。然后依次向相反方向进行连续而不间断地反复弯曲，如图 7-23 所示。

3) 弯曲操作应以每秒不超过一次的均匀速率平稳无冲击地进行。必要时，应降低弯曲速率，以确保试样产生的热量不致影响试验结果。

4) 试验中为确保试样与圆柱支座圆弧面的连续接触，可对试样施加某种形式的张紧力。施加的张紧力不得超过试样公称抗拉强度相对应应力值的 2%。

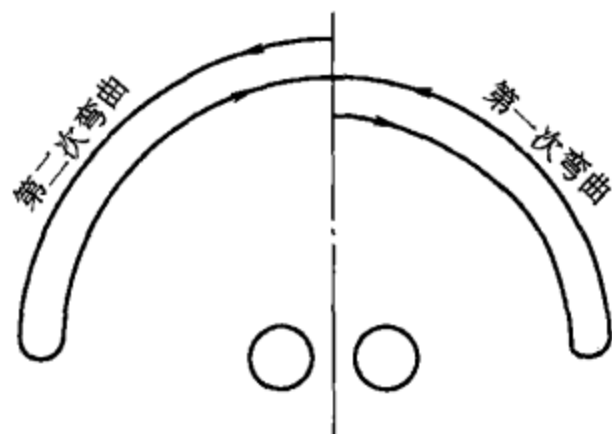


图 7-23 线材的弯曲

5) 连续试验至相关产品标准中规定的弯曲次数或肉眼可见的裂纹为止，或者若相关产品标准规定，连续试验至试样完全裂断为止。

6) 试样断裂的最后一次弯曲不计入弯曲次数。

### 7.5.10 焊接接头弯曲性能的测定

#### 1. 圆形压头弯曲

圆形压头弯曲如图 7-24 ~ 图 7-26 所示。把试样放在两个平行的辊筒上进行试验，焊缝应在两个辊筒间中心线位置，纵向弯曲除外。在两个辊筒间中点，即焊缝的轴线，垂直于试样表面通过压头施加载荷（三点弯曲），使试样逐渐连续地弯曲。

#### 2. 辊筒弯曲

辊筒弯曲如图 7-27 所示。辊筒弯曲是另一种试验方法，用于铝合金和异种材料接头。对于异种材料接头，其焊缝金属或一侧母材的屈服强度或规定非比例延伸强度低于母材。将试样的一端牢固的卡紧在两个平行辊筒的试验装置内进行试验，

通过外辊筒沿以内辊筒轴线为中心的圆弧转动，向试样施加载荷，使试样逐渐连续地弯曲。

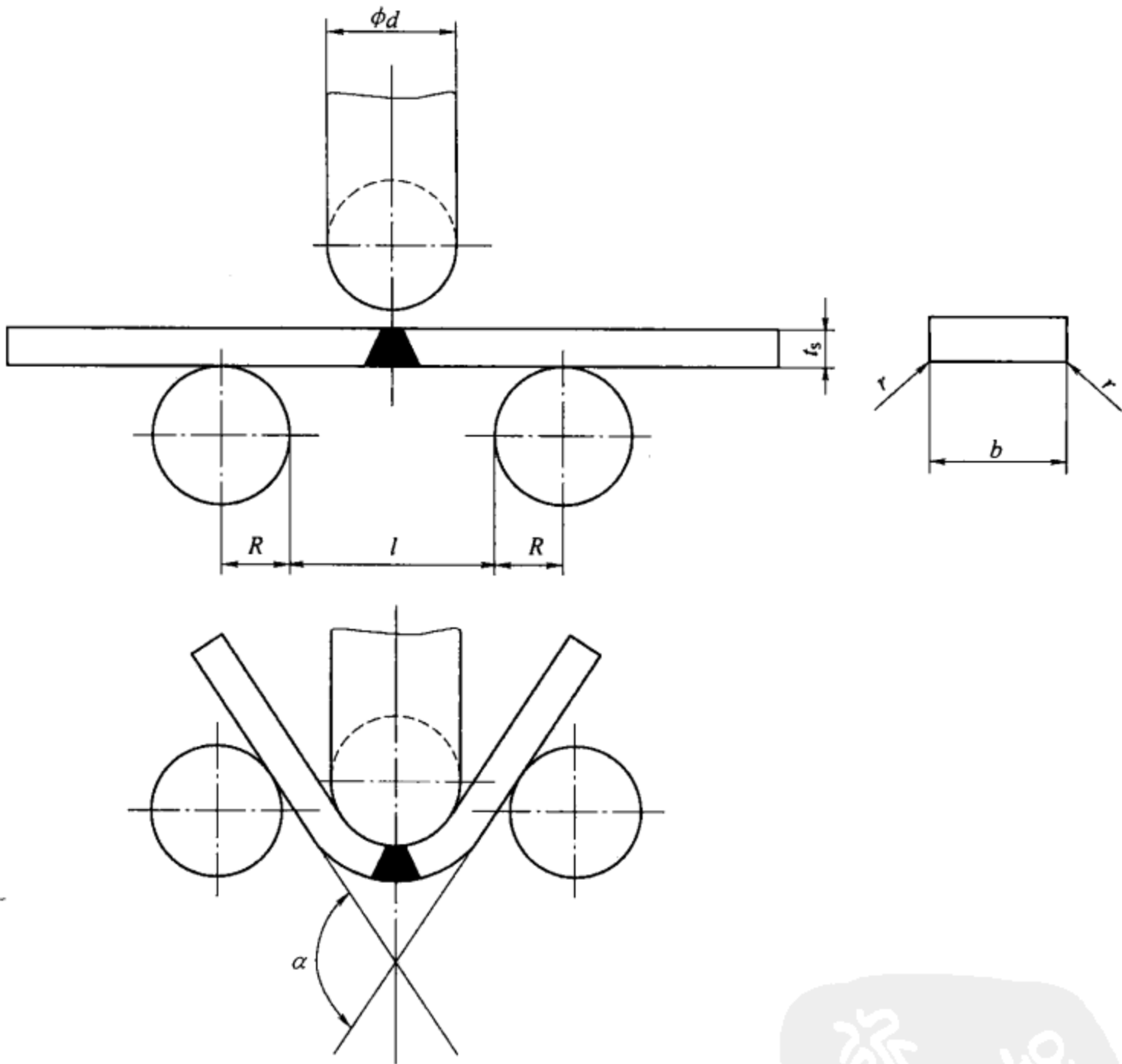


图 7-24 横向正弯或背弯试验

$l$ —辊筒间距离 (mm)  $R$ —辊筒半径 (mm)  $d$ —压头直径 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)  
 $r$ —试样棱角半径 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $\alpha$ —弯曲角度 ( $^{\circ}$ )

注:  $d + 2t_s < l \leq d + 3t_s$ 。

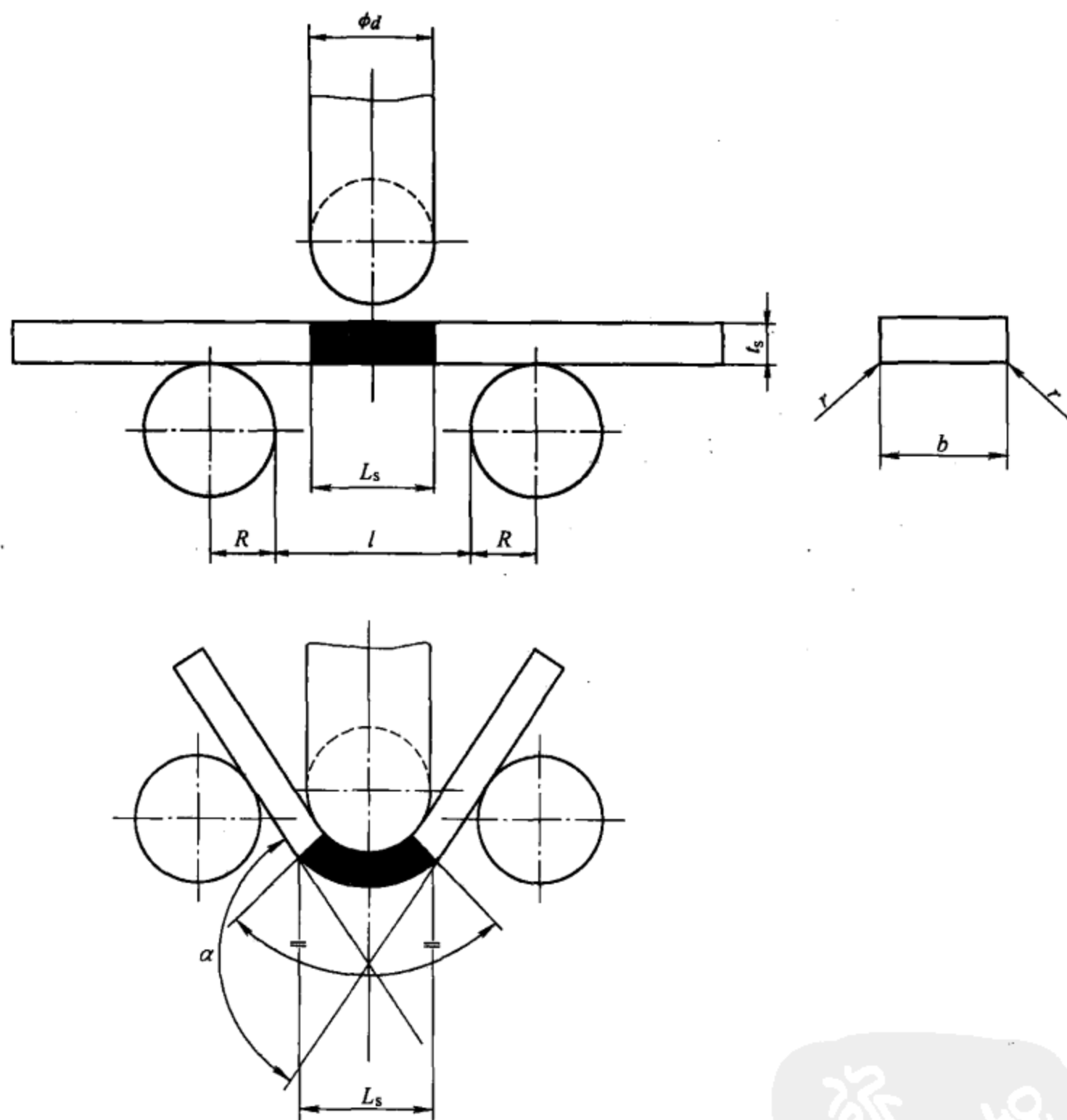


图 7-25 横向侧弯试验

$L_s$ —加工后试样上焊缝的最大宽度 (mm)  $l$ —辊筒间距离 (mm)  $R$ —辊筒半径 (mm)

$d$ —压头直径 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)  $r$ —试样棱角半径 (mm)

$t_s$ —试样厚度 (mm)  $\alpha$ —弯曲角度 ( $^{\circ}$ )

注:  $d + 2t_s < l \leq d + 3t_s$ ;  $d \geq 1.3L_s - t_s$ 。

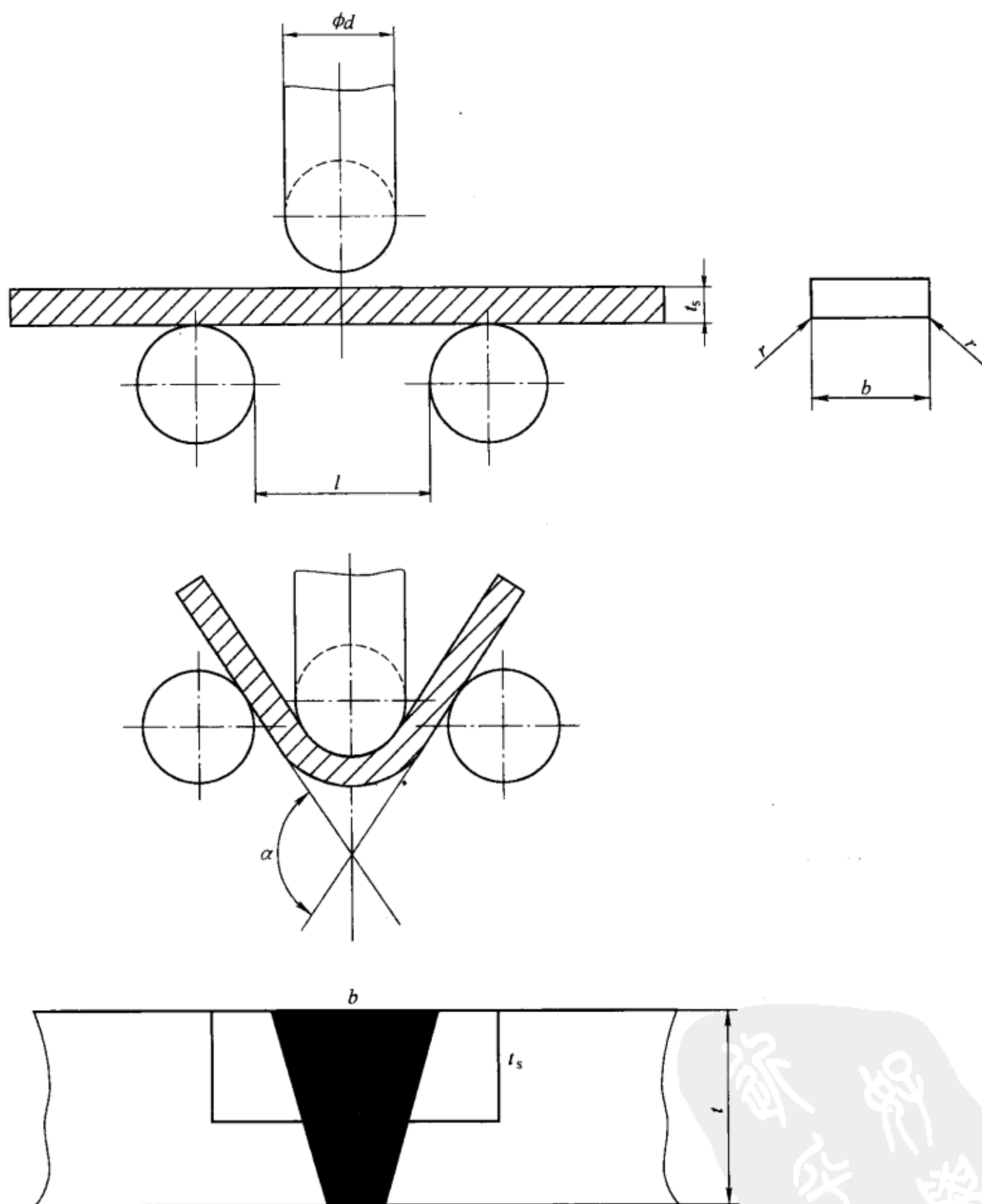


图 7-26 纵向弯曲试验

$l$ —辊筒间距离 (mm)  $d$ —压头直径 (mm)  $t$ —试样厚度 (mm)  $b$ —试样宽度 (mm)

$r$ —试样棱角半径 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $\alpha$ —弯曲角度 ( $^{\circ}$ )

注:  $d + 2t_s < l \leq d + 3t_s$ 。

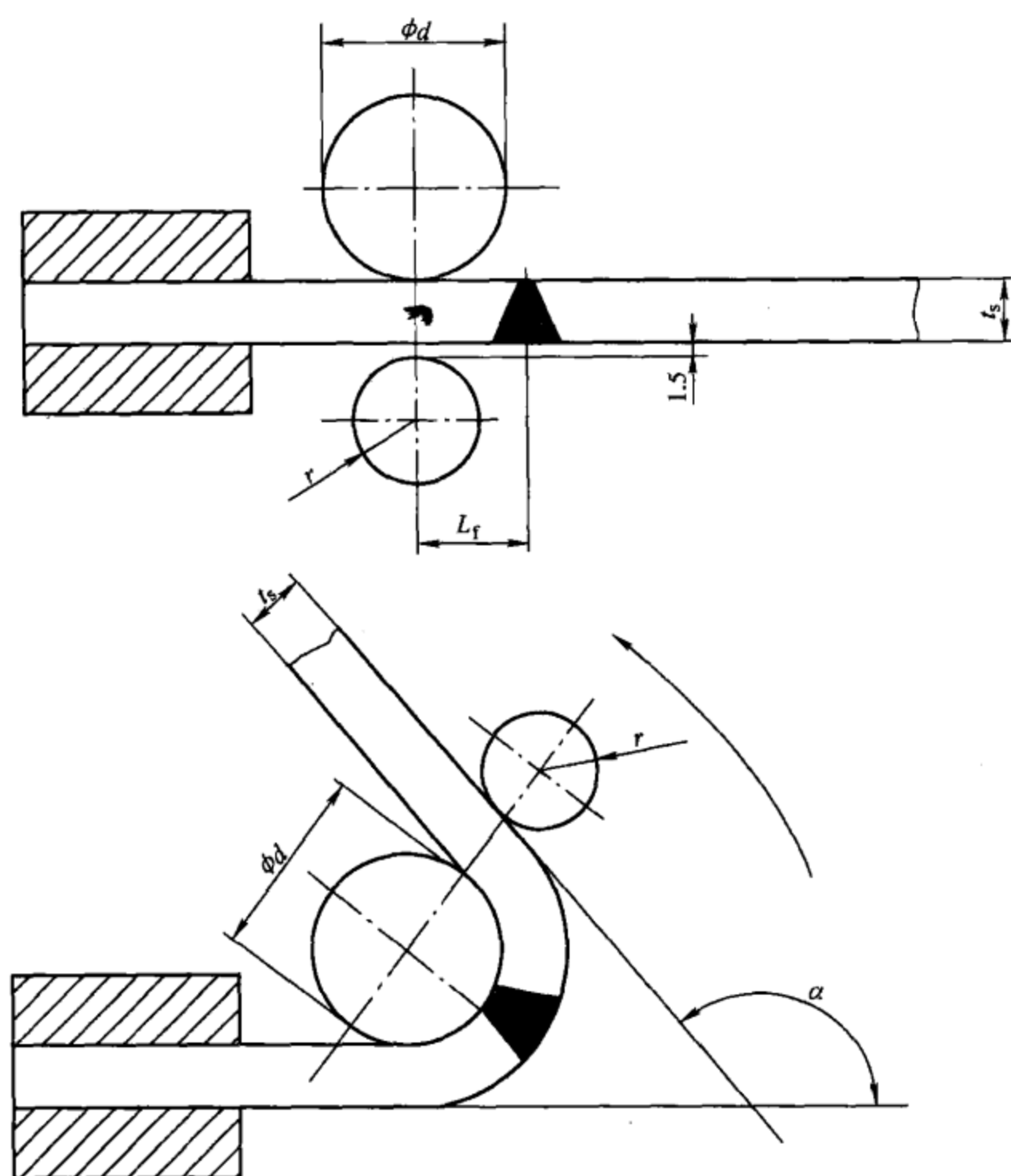


图 7-27 辊筒弯曲试验方法

$L_f$ —焊缝中心线与试样和辊筒接角点间初始距离 (mm)  $d$ —压头直径 (mm)

$r$ —试样棱角半径 (mm)  $t_s$ —试样厚度 (mm)  $\alpha$ —弯曲角度 ( $^{\circ}$ )

注:  $0.7d < L_f < 0.9d$ 。

新学网  
PDG

## 第 8 章 金属材料的剪切性能

### 8.1 剪切性能相关知识

#### 8.1.1 剪切性能和剪切试验的定义

金属材料抵抗侧面受大小相等、方向相反、作用线相近的外力作用，而沿外力作用线平行的受剪面产生错动的能力，称为材料的剪切性能。

工程结构中的一些零件除承受拉伸、压缩和弯曲等载荷作用外，还有一些零件如桥梁结构中的铆钉、销子等主要承受剪切力的作用，对这些零件所使用的材料要进行剪切试验，提供材料的抗剪强度作为设计依据。

##### 1. 双剪切试验

双剪切试验如图 8-1 所示，它是以剪断圆柱状试样的中间段方式来实现的。两侧支承距离应不小于中间被切断部分直径的  $1/2$ 。双剪切试验夹具刀口形状如图 8-2 所示。

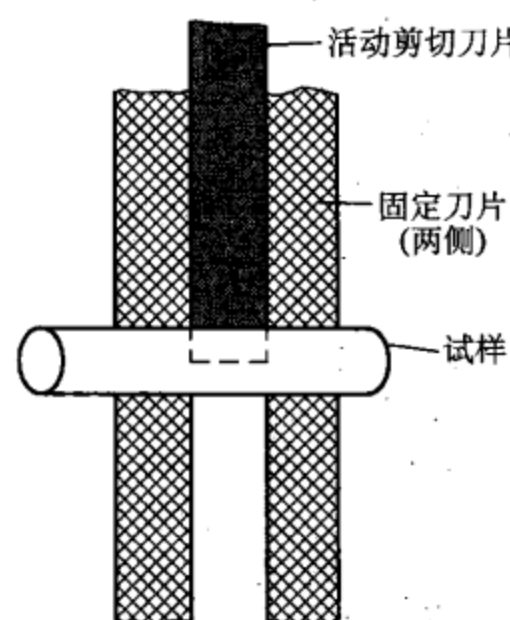


图 8-1 双剪切试验

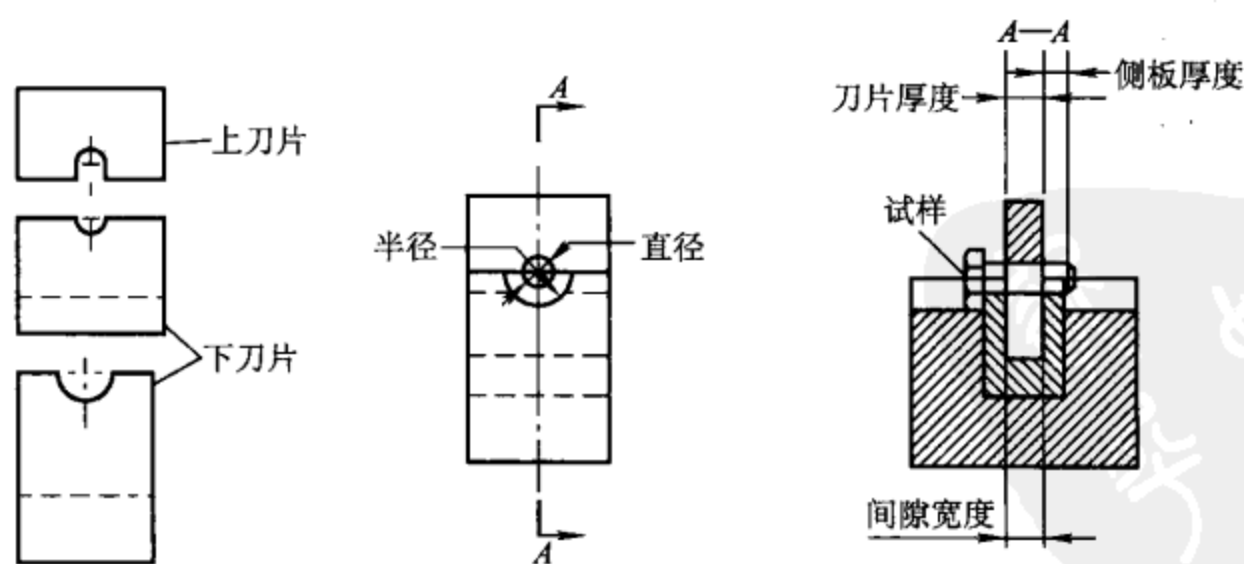


图 8-2 双剪切试验夹具刀口形状

双剪切试验的特点是有两个处于垂直状态下的剪切刀片，下刀片（厚度大小为被剪切试样直径大小）平行地放置在上方，上下刀片都作成孔状，孔径等于试



样直径。双剪切试验可利用万能拉伸试验机进行。

进行双剪切试验时，刀片应当平行、对中，剪切刀刃不应有擦伤、缺口或不平整的磨损。

## 2. 单剪切试验

单剪切试验夹具使用两个剪切刀片，刀片中间带孔，如图 8-3 所示。当一个刀片固定不动，另一个刀片在图示平行面内移动时产生单剪切作用，剪断试样。

单剪切试验适合于测定长度太短，不能进行双剪切的紧固件的剪切值，包括杆长小于直径 2.5 倍的紧固杆件。单剪切试验的准确度低于双剪切试验，如果发现单剪切值有问题时，可以用双剪切值作校核。

## 3. 冲压剪切试验

剪切试验中更简单的方法是利用冲头-模具法直接从板材或带材中冲出一小圆片的方法，如图 8-4 所示。这种方法主要用于铝工业中厚度不大于 1.8mm 的材料。为了能获得规则的剪切边缘，冲压剪切试验值应低于双剪切试验值的 12% ~ 14%。

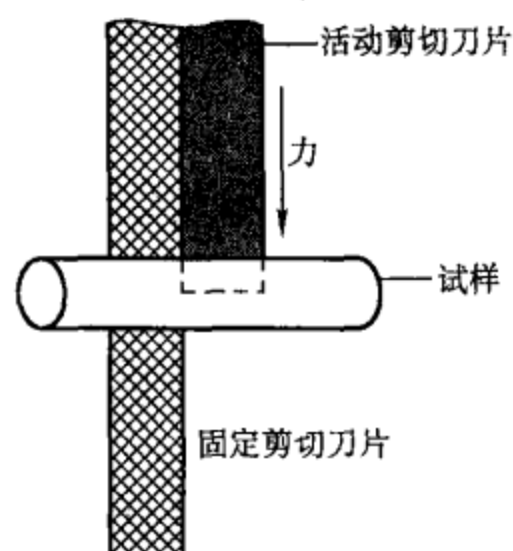


图 8-3 单剪切试验

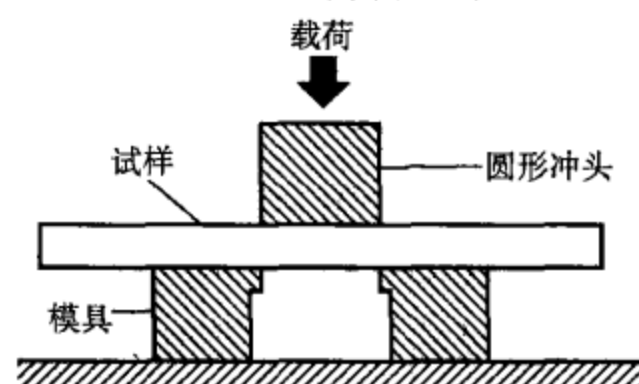


图 8-4 冲压剪切试验

## 8.1.2 剪切试验常用术语

(1) 抗剪强度 ( $\tau_b$ ) 材料能经受的最大剪切应力。在剪切试验中，抗剪强度是用剪切试验中的最大试验力除以试样的剪切面积所得的应力。

(2) 试验温度下的抗剪强度 ( $\tau_{b,t}$ ) 在某一试验温度  $t$  下测得的抗剪强度。

## 8.2 剪切试样的制备

### 8.2.1 一般要求

- 1) 试样表面应光滑，无裂纹、夹层、凹痕、擦伤、锈蚀等缺陷。
- 2) 试样直径的测量精度为 0.01mm，横截面积计算精确到 0.01mm<sup>2</sup>。

### 8.2.2 线材试样

- 1) 线材稍有弯曲，可以在木垫上用木锤轻敲矫直。但在矫直过程中，应尽量

将加工硬化对性能的影响减到最低,且不应该损伤试样,试样尖锐棱边应去掉。

2) 直径大于6mm的线材,可加工成直径不大于6mm的试样进行试验。凡需切削加工后进行试验的试样,按图8-5的要求制备。

### 8.2.3 铆钉试样

1) 从线材上切取一段适当长度的试样样坯,其上应附有牌号、规格、批号、试样号及特殊热处理制度和试验日期等标记。

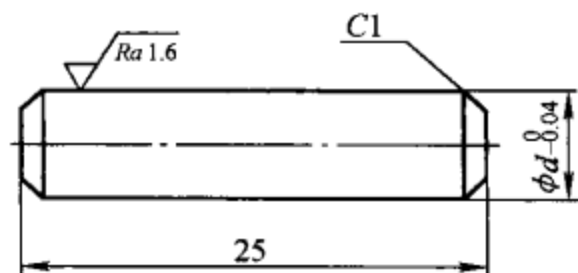


图 8-5 剪切试样

2) 每批铆钉试样取不少于6个试样,每盘金属丝两端0.5m处各取3个试样。

3) 试样的长度( $L$ )直径( $d$ )的关系为: $L = 1.4d + 10\text{mm}$ 。

4) 从样坯上切取试样时不允许损伤试样原表面。试样的两个端面应平整,并与中心线垂直,周边无毛刺。

## 8.3 剪切试验设备

### 8.3.1 线材和铆钉剪切试验设备

1) 可以使用各种类型的拉力、压力或万能试验机进行试验。试验机应保证使夹具的中心线与试验机的加力轴线一致,加力应连续、平稳、无振动。

2) 试验机准确度应为1级或优于1级。

3) 试验时可以使用各种形式的双剪夹具,剪切圈和支承圈应采用高强度合金且在试验温度下有足够硬度的材料。

4) 剪切圈、支承圈孔径和试样直径之间的间隙不大于0.1mm,剪切圈和支承圈之间的间隙不大于0.1mm。剪切圈、支承圈的厚度为线材直径的1.3~3.0倍。其刀口应锐利、无缺损。

5) 切刀、夹板、剪切圈和支承圈表面应光滑,其表面粗糙度  $Ra$  应不大于  $1.6\mu\text{m}$ 。

6) 切刀之间的摩擦力应尽量小而不至于影响载荷值。

7) 高温剪切夹具如图8-6所示。其主要部件切刀、键、夹板、剪切圈和支承圈如图8-7~图8-11所示。

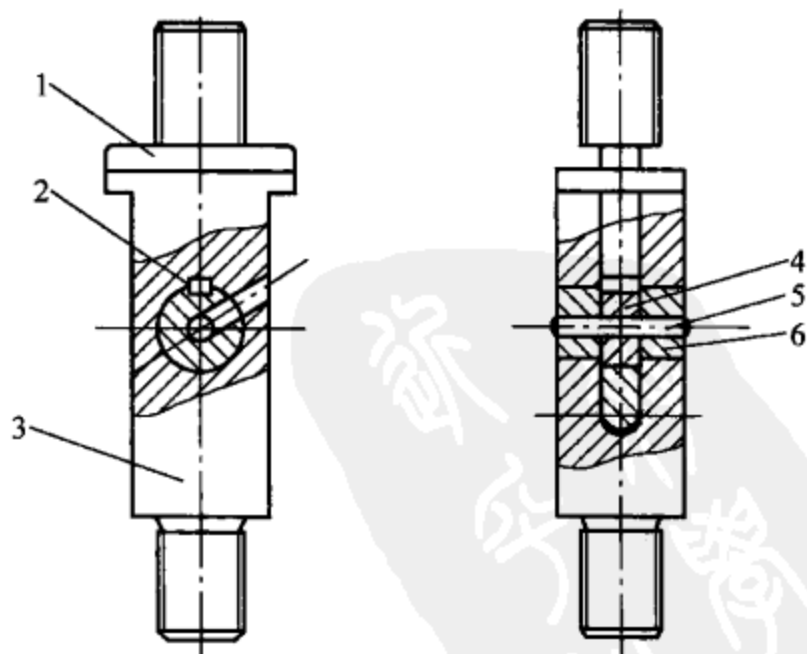


图 8-6 高温剪切夹具

1—切刀 2—键 3—夹板 4—剪切圈 5—试样  
6—支承圈

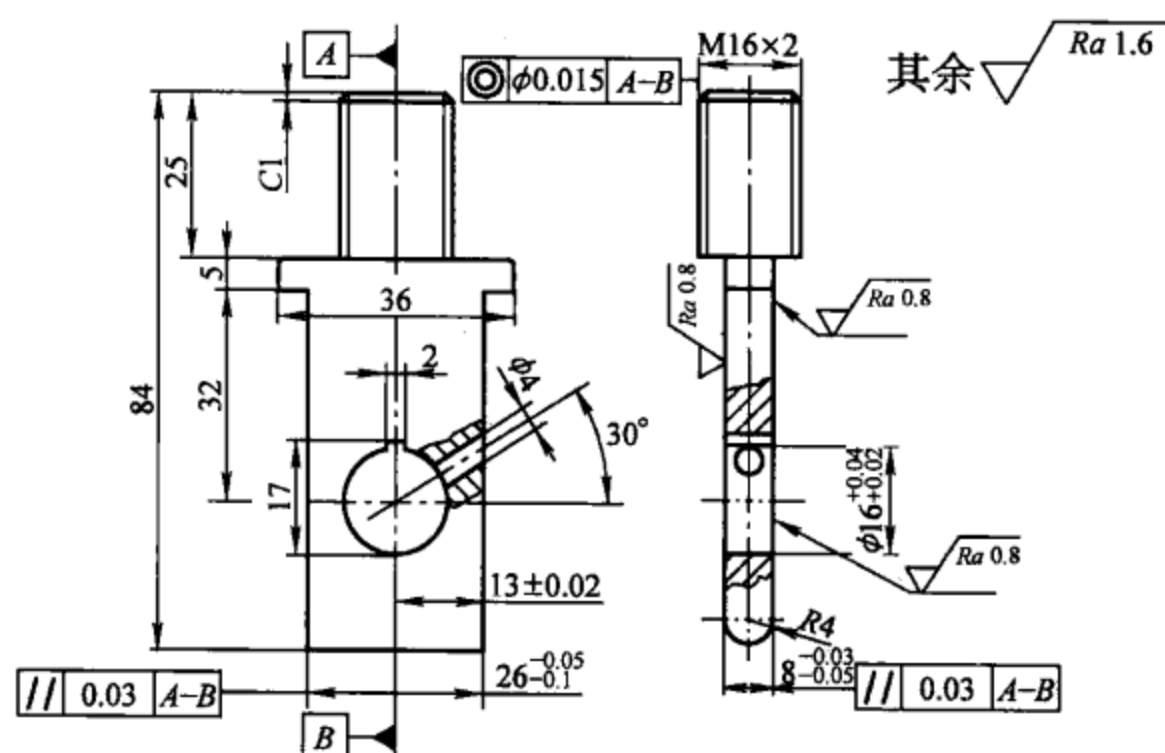


图 8-7 切刀

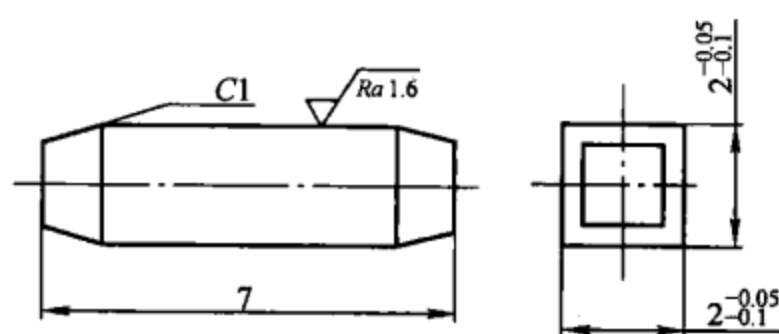


图 8-8 键

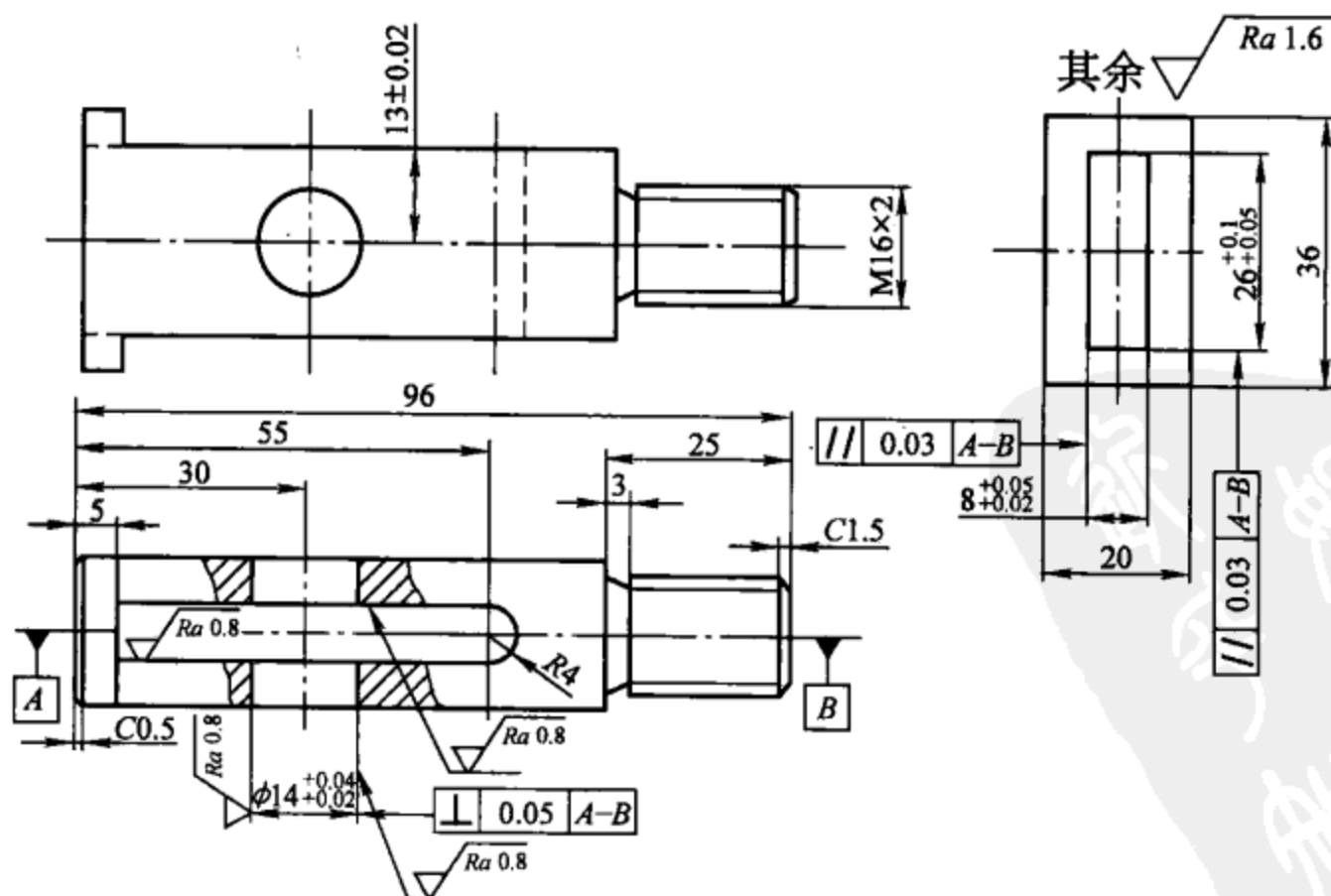


图 8-9 夹板



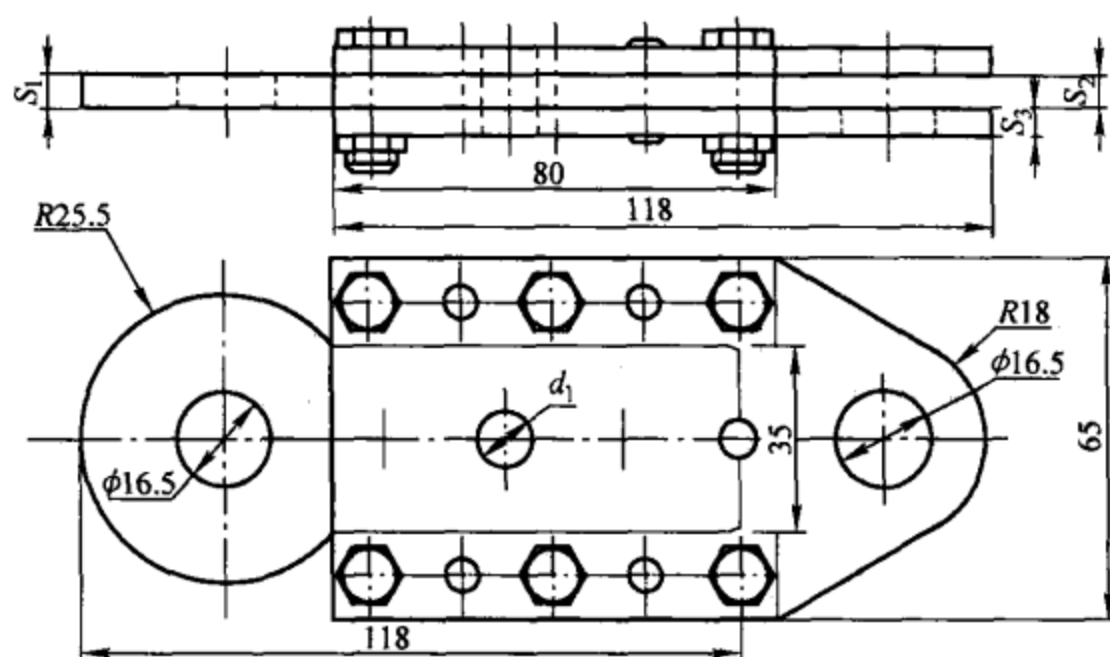


图 8-13 室温拉式双剪工具尺寸

表 8-1 室温拉式双剪工具的尺寸及偏差

(单位: mm)

铆钉线 公称直径 $d$	工作孔		剪刀		垫块		夹板公称 厚度 $S_3$
	公称直径 $d_1$	偏差	公称厚度 $S_1$	偏差	公称厚度 $S_2$	偏差	
$>1.6 \sim 4$	$d + 0.05$	$+0.025$	6	0 $-0.010$	$S_1 + 0.015$	$+0.015$ 0	5
$>4 \sim 8$			8				6
$>8 \sim 10$		0	12				8

9) 室温拉式单剪夹具如图 8-14 所示。

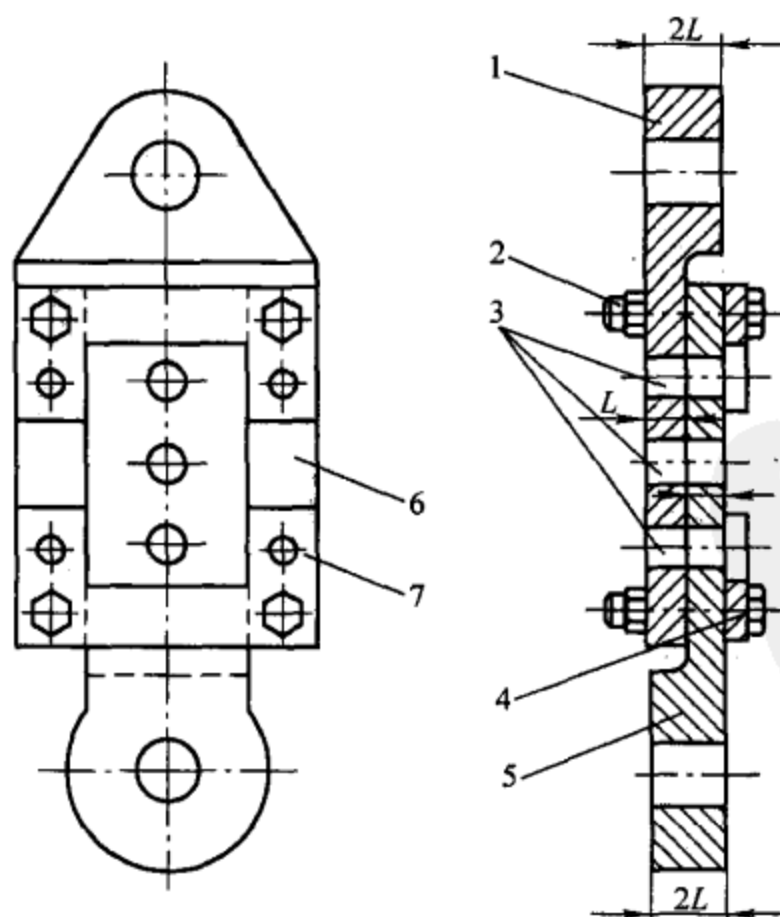


图 8-14 室温拉式单剪夹具

1—切刀 2—螺栓 3—剪切孔 4—压板 5—切刀 6—垫板 7—定位销

### 8.3.2 销剪切试验设备

销的剪切试验在夹具中完成,典型的夹具如图8-15所示。在夹具中销子支承各个零件。为了施加载荷,各配合零件应有与销公称直径相等的孔径(公差为H6),且硬度不低于700HV。支承零件与加载零件间的间隙不应超过0.15mm,剪切面与销的每一末端面应最少留有一倍销径的距离,同时两剪切面间的间距最少应为两倍销径。当销子太短而不能作双面剪切试验时,应改用两个销子同时作单面剪切试验。弹性销在试验夹具中的安装应使槽口向上。

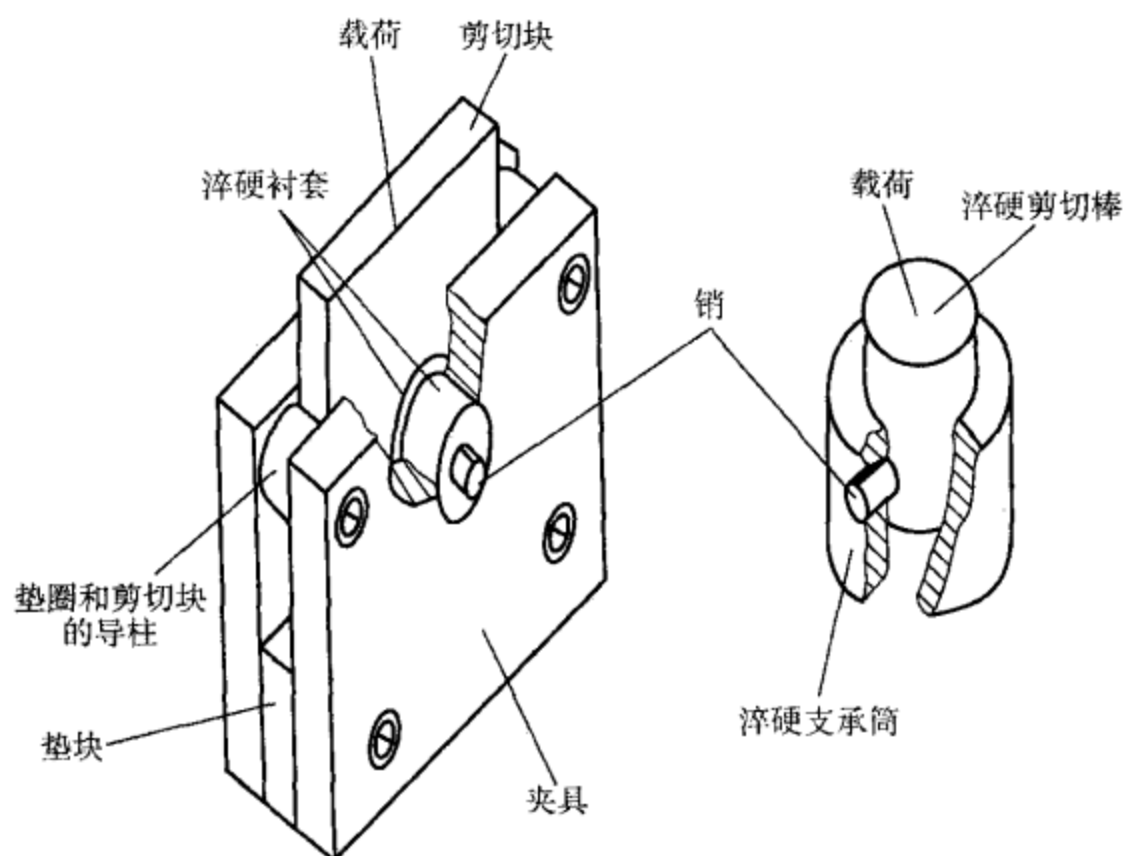


图8-15 销剪切试验夹具

## 8.4 试验要求

### 8.4.1 线材及铆钉剪切试验要求

- 1) 室温试验应在10~35℃范围内进行,高温试验在规定温度下进行。
- 2) 进行高温试验时,在试样上用一支热电偶直接测量试样中部温度。
- 3) 剪切试验速度(试验机横梁移动速度)不大于5mm/min。

### 8.4.2 销剪切试验要求

- 1) 销子应试验到剪断为止。当试验载荷达到最大载荷的同时销子断裂,或未达到最大载荷之前销子断裂,都认为断裂时的载荷是销子的双面剪切载荷。

- 2) 销子经剪切试验后, 断裂口应为没有纵向裂缝的韧性切口。
- 3) 试验速度应不大于 13mm/min。

## 8.5 剪切性能的测定

- 1) 按试验程序进行测试。
- 2) 记录试样发生剪切断裂前, 所承受的最大试验力  $F_m$ 。
- 3) 双剪试验时, 按下式计算抗剪强度:

$$\tau_b = \frac{F_m}{2S_0}$$

单剪试验时, 按下式计算抗剪强度:

$$\tau_b = \frac{F_m}{S_0}$$

式中  $\tau_b$ ——抗剪强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $F_m$ ——最大试验力, 单位为  $\text{N}$ ;  
 $S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ 。

- 4) 高温试验试样加热到试验温度的时间一般不大于 1h, 保温时间为 15 ~ 30min, 然后施加试验力, 记录试样剪切时的最大试验力  $F_m$ , 并按下式计算抗剪强度:

$$\tau_{b,t} = \frac{F_m}{2S_0}$$

式中  $\tau_{b,t}$ ——试验温度下的抗剪强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $F_m$ ——最大试验力, 单位为  $\text{N}$ ;  
 $S_0$ ——试样原始横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ 。

- 5) 剪断后, 如试样发生弯曲, 或断口出现楔形、椭圆形等剪切截面, 则试验结果无效。



## 第9章 金属材料的断裂韧性

### 9.1 断裂韧性相关知识

#### 9.1.1 断裂韧性及断裂韧性试验的定义

断裂力学是研究材料内部存在裂纹情况下的强度科学。它研究带有裂纹的材料强度规律和断裂过程，从中提炼出一系列新的强度和韧性指标，为解决零部件内存在裂纹情况下的安全和寿命提供了新方法，从而为安全设计、材料评价、无损检测标准的制订，以及零部件寿命的估计提供了依据。

断裂韧性主要包括材料的平面应变止裂韧性  $K_{Ia}$ 、平面应变断裂韧性  $K_{Ic}$ 、动态断裂韧性  $K_{Id}$ 、延性断裂韧性  $J_{Ic}$  等性能指标。

断裂韧性试验过程，就是把试验材料制成一定形状尺寸的试样，有时预制出相当于缺陷的裂纹，然后对试样加载，最终测试并计算出材料断裂韧性的各种性能指标。

#### 9.1.2 断裂韧性试验常用术语

(1) 裂纹止裂断裂韧性 ( $K_a$ ) 裂纹刚刚止裂时的应力强度因子值。

(2) 平面应变裂纹止裂断裂韧性 ( $K_{Ia}$ ) 裂纹前缘处于平面应变状态下的裂纹止裂韧性值。

(3) 平面应变裂纹止裂断裂韧性条件值 ( $K_{Qa}$ ) 根据试验结果计算得到的  $K_{Ia}$  条件值，还需按相关判据进行有效性判定。

(4) 裂纹启裂应力强度因子 ( $K_0$ ) 快速断裂开始时的应力强度因子值。

(5) 应力强度因子 ( $K$ ) 对于均匀线弹性体的弹性应力场的大小。应力强度因子是施加力、试样尺寸、几何形状和裂纹长度的函数。

(6) 张开型 (I 型) 应力强度因子 ( $K_I$ ) 表征了在承受张开型 (I 型) 加载时的裂纹尖端线弹性应力场的大小。它是施加的力、试样尺寸、几何形状和裂纹长度的函数。

(7) 平面应变断裂韧性 ( $K_{Ic}$ ) 按一定的操作程序来测定，在裂纹尖端附近的应力状态处于平面应变状态，且裂纹尖端塑性变形受到约束时，材料对裂纹扩展的抗力。它是在塑性变形受到严重约束以增加力的情况下产生裂纹扩展时的  $K_I$  的临界值。

(8) 裂纹平面取向 一种叙述裂纹扩展平面和方向与产品的特定方向相关的方法。在描述垂直于裂纹平面的方向时要用连字符连接的符号表示，连字符前面的符号代表裂纹平面的法线方向，连字符后面的符号表示预期的裂纹扩展方向，如图 9-1 所示。对于锻造金属，通常用字母  $X$  表示产品的主要变形（最大晶粒流动）方向，用字母  $Y$  表示最小变形方向，用字母  $Z$  表示  $X-Y$  平面的第三正交方向。如果试样的方向与产品的特征晶粒流动方向不一致时，用两个字母标记裂纹面的法向方向和预期的裂纹扩展方向，如图 9-1 所示。如果没有晶粒流动方向（如铸造材料），参考轴可以任意指定，但应清晰标明。

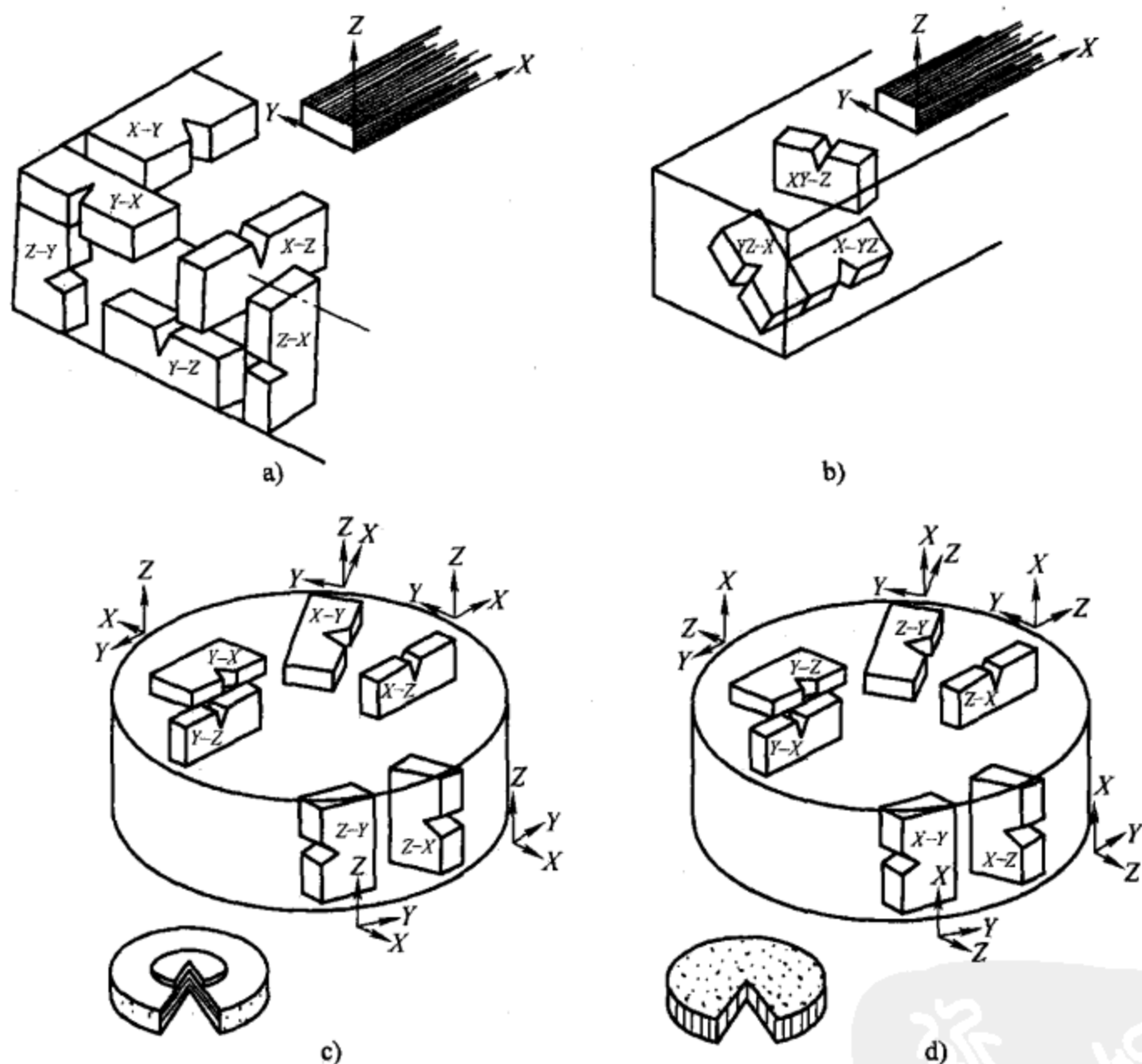


图 9-1 裂纹平面的标记

- a) 与晶粒流动方向一致 b) 与晶粒流动方向不一致 c) 径向晶粒流动、轴向加工方向  
d) 径向晶粒流动、径向加工方向

(9) 缺口张开位移 ( $V$ ) 在缺口嘴附近测量到的张开位移。

(10) 裂纹深度 ( $a$ ) 表面裂纹前缘最深点到试样前表面的距离，裂纹深度是试样厚度的一部分。

(11) 裂纹长度 ( $2c$ ) 表面裂纹前缘与试样前表面相交的两点间的距离。

(12) 剩余强度 ( $\sigma_r$ ) 最大拉伸载荷与试样横截面面积之比。

## 9.2 断裂韧性试样的制备

### 9.2.1 平面应变裂纹止裂断裂韧性试样

#### 1. 试样形状

平面应变裂纹止裂断裂韧性试样形状如图 9-2 所示。

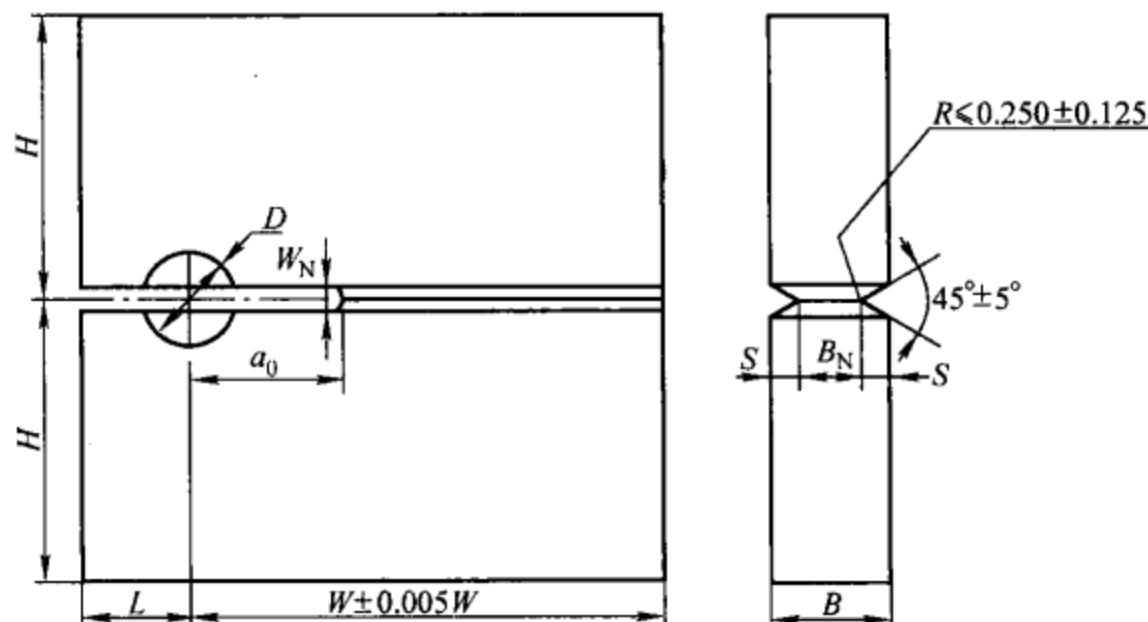


图 9-2 试样形状

$H$ —试样的半高度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

$B_N$ —试样净厚度 (mm)  $L$ —试样加载中心孔距试样前端的距离 (mm)

$a_0$ —试样缺口长度 (mm)

注:  $H = 0.6W \pm 0.005W$ ,  $S = (B - B_N)/2 \pm 0.01B$ ,  $W_N \leq W/10$ ,  $0.15W \leq L \leq 0.25W$ ,

$0.30W \leq a_0 \leq 0.40W$ ,  $0.125W \pm 0.005W \leq D \leq 0.250W \pm 0.005W$ 。

#### 2. 试样尺寸

1) 厚度  $B$  应为板材全厚度或满足平面应变条件的足够厚度。

2) 试样侧槽深度为  $B/8$ 。缺口顶端为脆性合金，焊接后在试样的上下两面开侧槽。

3) 试样的宽度范围为  $2B \leq W \leq 8B$ 。

#### 3. 缺口

1) 缺口制作方式是缺口脆性焊接，如图 9-3 所示。缺口应有足够宽度  $W_N$ ，能够使焊条到达狭缝的底部。

2) 缺口长度范围为  $0.30W \leq a_0 \leq 0.40W$ ，有时可以减少至  $0.20W$ 。

3) 也可以采用其他裂纹前端形状

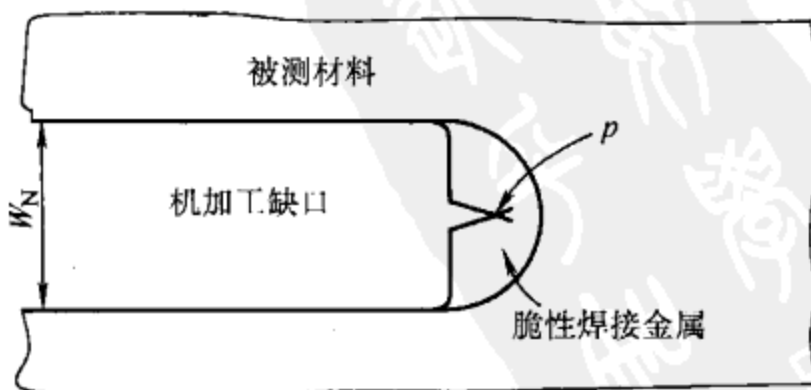


图 9-3 使用缺口脆性焊接引发裂纹

$W_N$ —缺口宽度 (mm)  $\rho$ —缺口根部半径 (mm)

和脆化方法。高强钢可使用简单的机加工缺口，高强度低韧性合金试样的缺口可以使用电子束焊接。

## 9.2.2 平面应变断裂韧性试样

### 1. 试样尺寸

试样的厚度  $B$ 、裂纹长度  $a$ 、韧带尺寸  $W - a$  应同时满足  $B \geq 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$ 、 $a \geq 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$  和  $W - a \geq 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$  的要求，其中， $K_{IC}$  是平面应变断裂韧性 ( $N/mm^{3/2}$ ， $1N/mm^{3/2} = 0.0316MPa \cdot m^{1/2}$ )， $R_{p0.2}$  是规定非比例延伸强度 ( $N/mm^2$ )。

### 2. 试样的形状

1) 裂纹起始缺口与最大允许缺口（裂纹）包迹如图 9-4 所示。

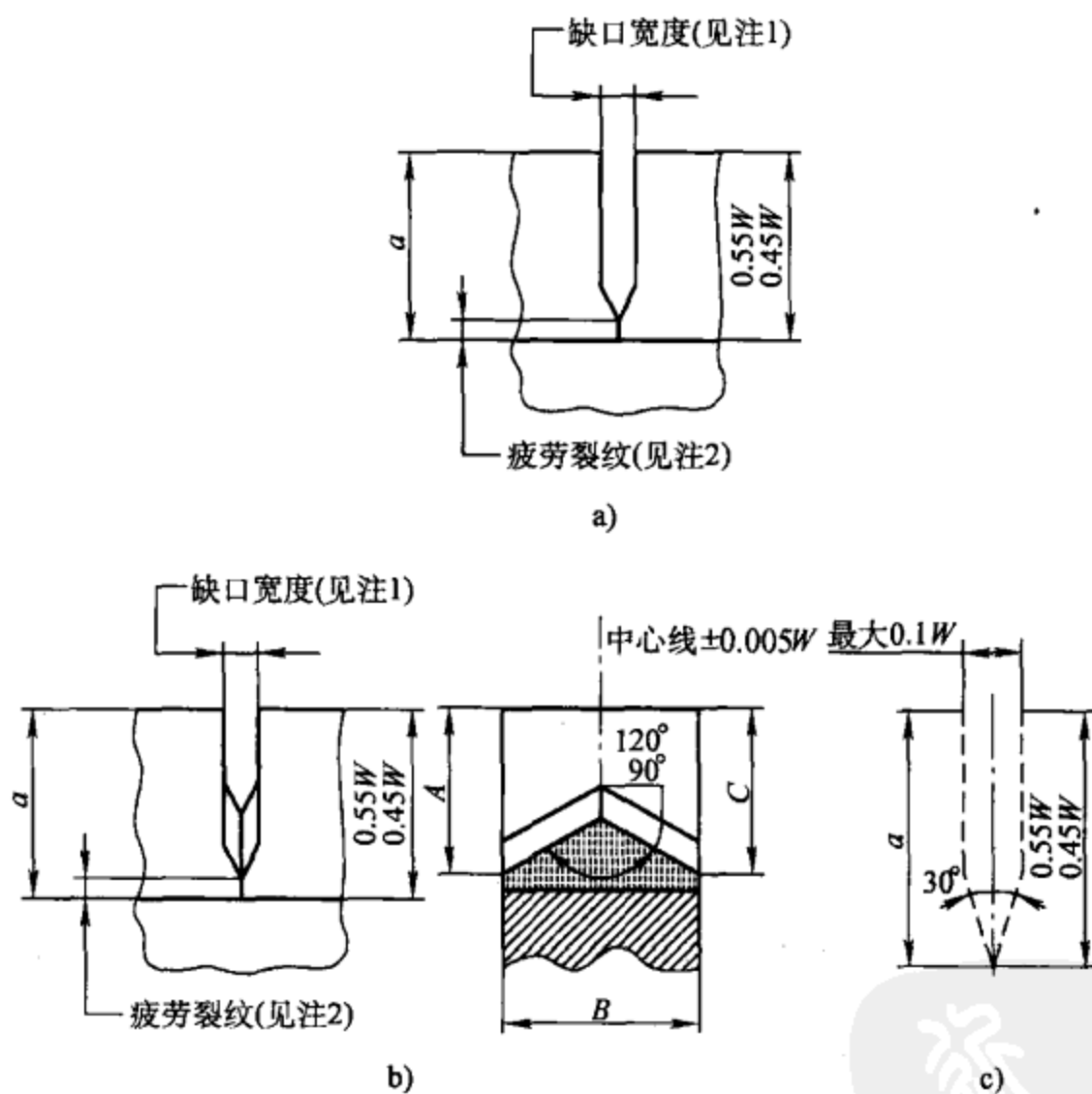


图 9-4 裂纹起始缺口与最大允许缺口（裂纹）包迹

a) 直通形缺口 b) 山形缺口 c) 包迹

$a$ —裂纹长度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)  $A = C$

注：1. 裂纹起始缺口应垂直于试样表面，偏差在  $\pm 2^\circ$  以内，缺口宽度应在  $0.1W$  以内，但不应小于  $1.6mm$ 。

2. 对于直通形缺口试样，建议缺口根部半径最大为  $0.1mm$ ，切口尖端角度最大为  $90^\circ$ 。每个表面上的最大疲劳裂纹扩展量至少应为  $0.025W$  或  $1.3mm$ ，取其较大者。

3. 对于山形缺口试样，建议缺口根部半径最大为  $0.025mm$ ，切口尖端角度最大为  $90^\circ$ ， $A = C$ ，偏差应在  $0.01W$  以内，疲劳裂纹应在试样的两个表面上都出现。

2) 三点弯曲试验用试样如图 9-5 所示。

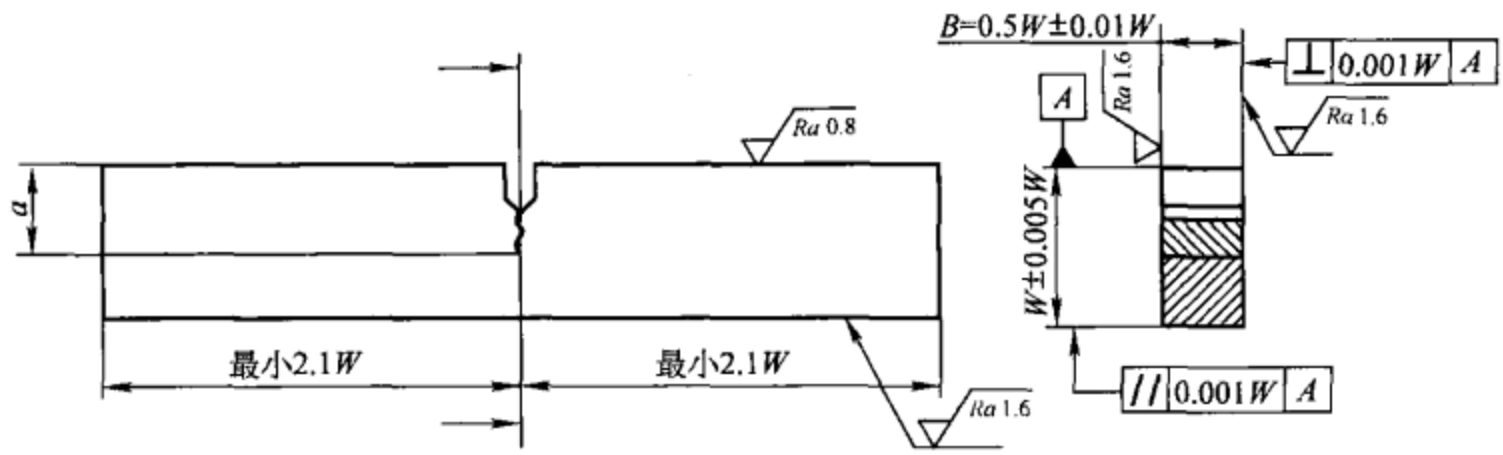


图 9-5 三点弯曲试验试样

$a$ —裂纹长度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

3) 紧凑拉伸试样如图 9-6 所示。

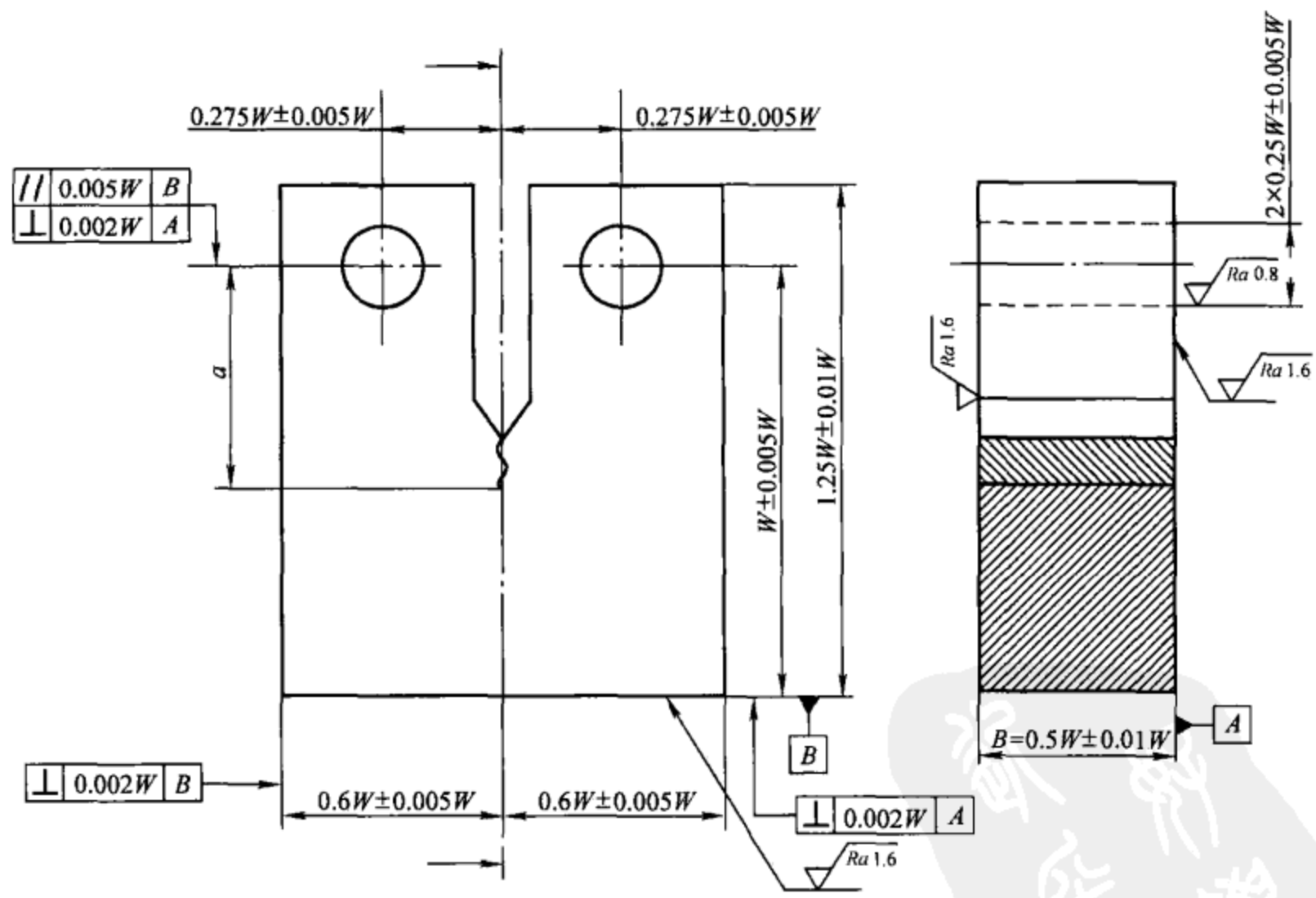


图 9-6 紧凑拉伸试样

$a$ —裂纹长度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

4) 台阶形缺口紧拉试样如图 9-7 所示。

5) C 形拉伸试样如图 9-8 所示。

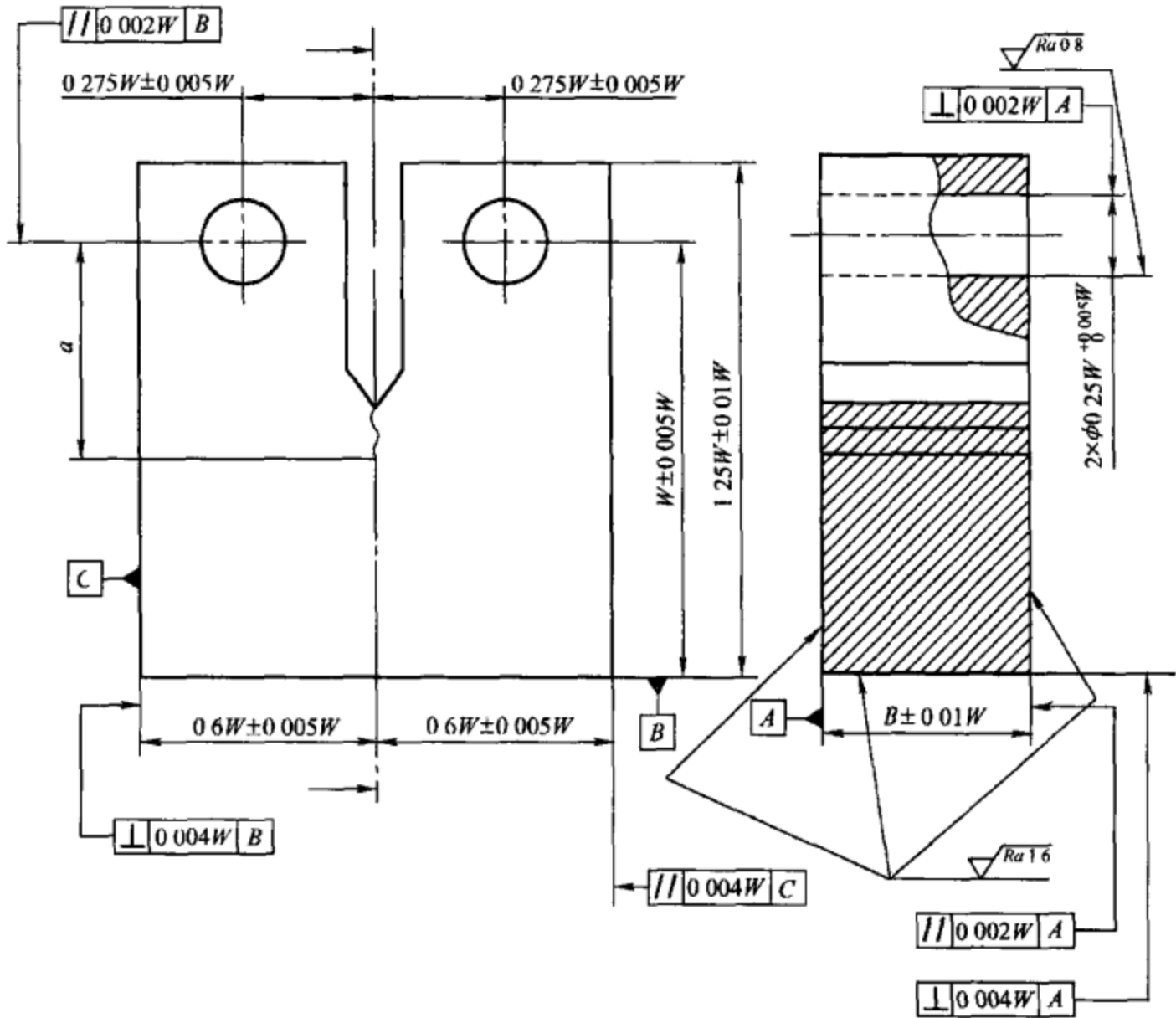


图 9-7 台阶型缺口紧拉试样

$a$ —裂纹长度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

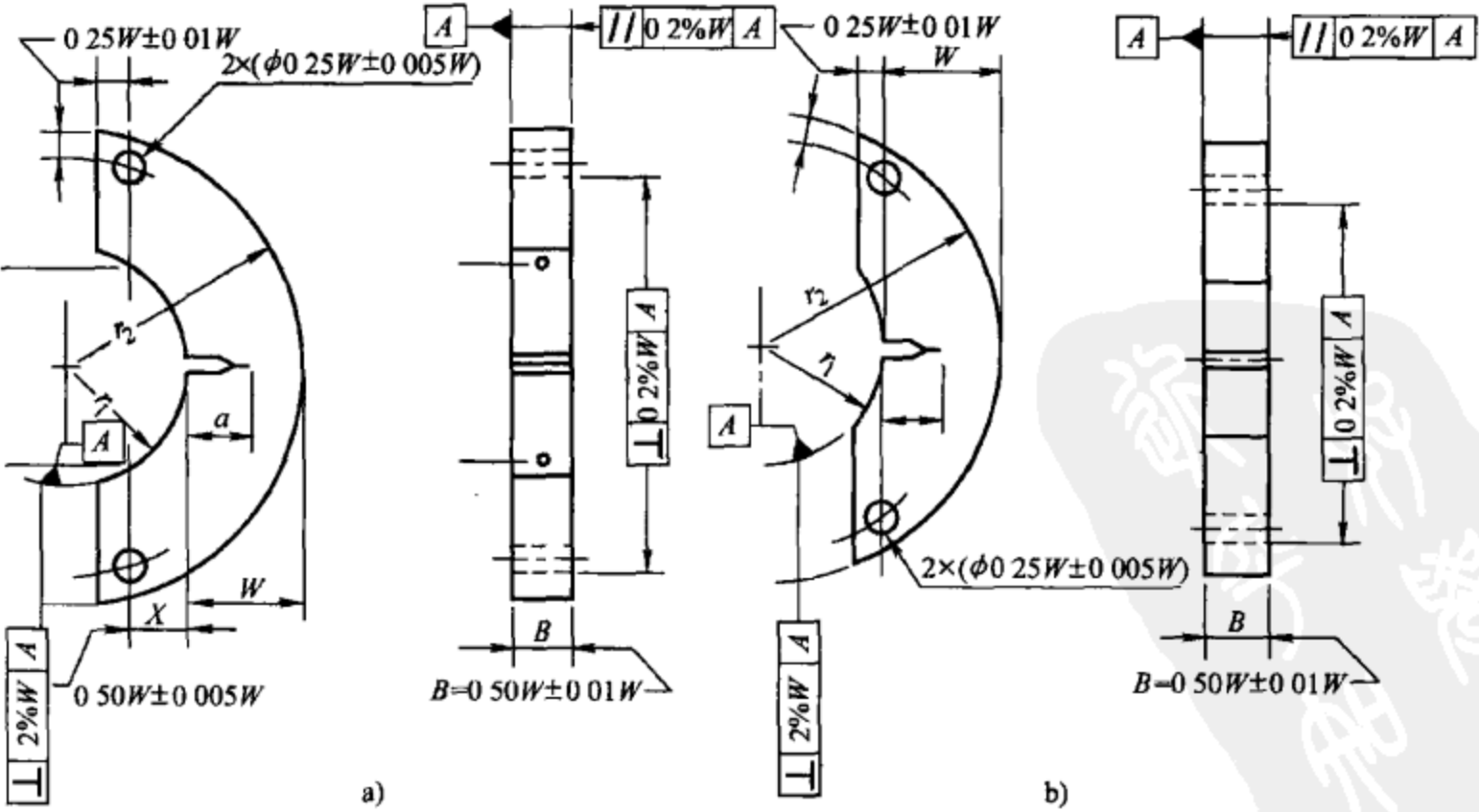


图 9-8 C 形拉伸试样

a)  $X/W=0.5$  b)  $X/W=0$

6) 圆形紧凑拉伸试样如图 9-9 所示。

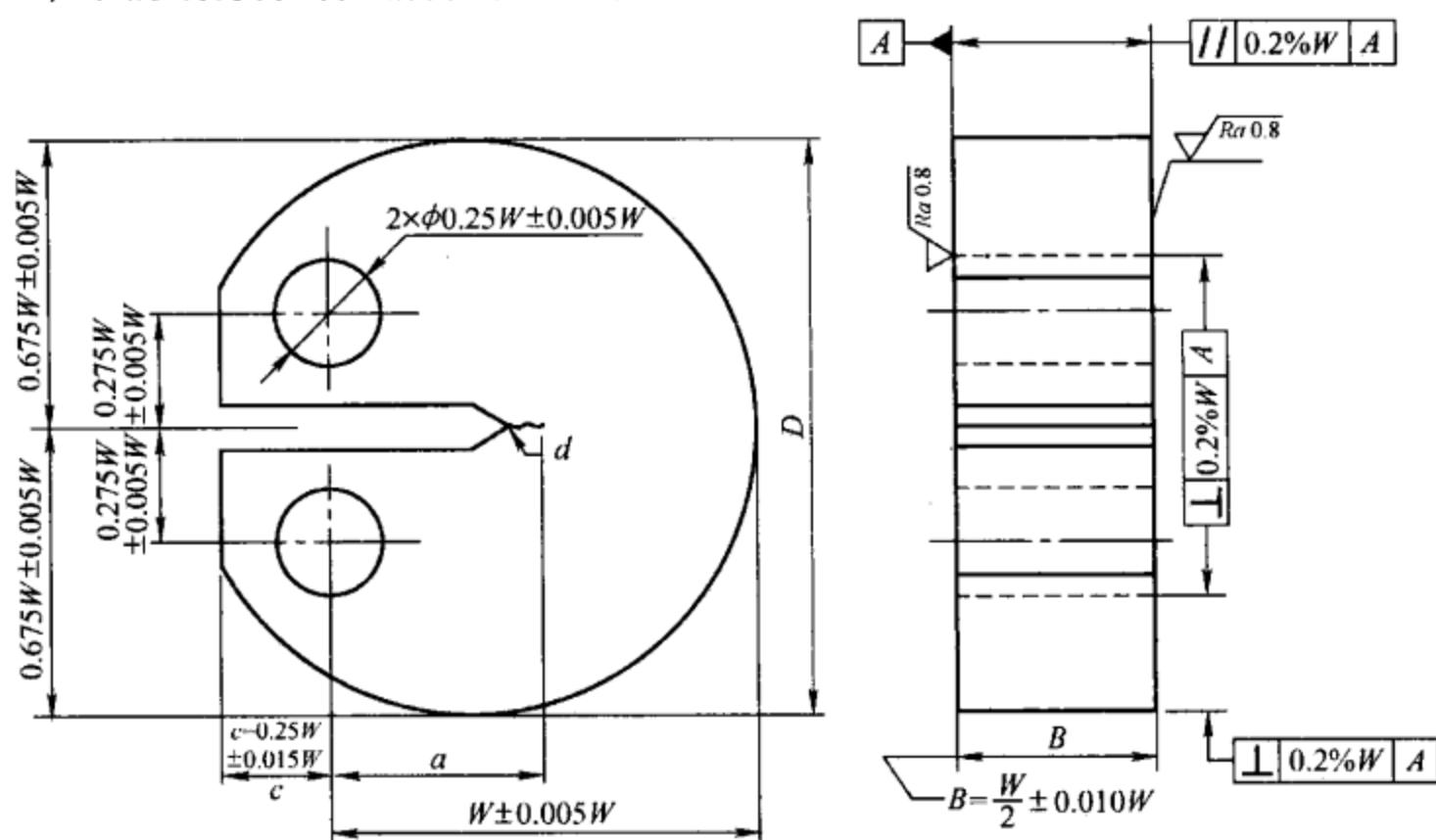


图 9-9 圆形紧凑拉伸试样

### 9.2.3 表面裂纹拉伸断裂韧性试样

1) 表面裂纹拉伸断裂韧性试样如图 9-10 所示。

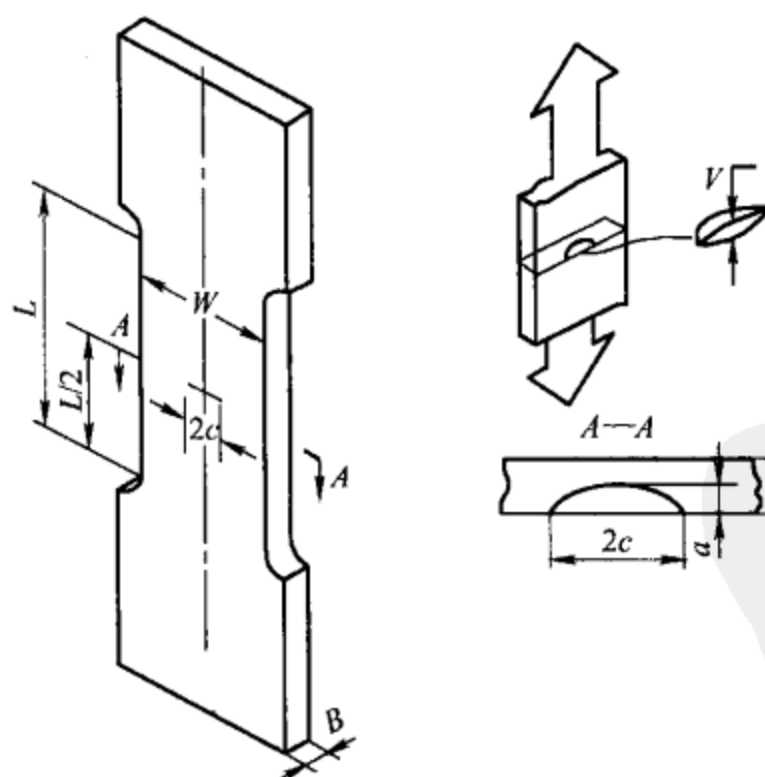


图 9-10 典型表面裂纹试样

$L$ —试样测试部分长度 (mm)  $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

$V$ —表面裂纹试样中心处的裂纹嘴张开位移 (mm)  $a$ —裂纹深度 (mm)

$2c$ —裂纹长度 (mm)



2) 表面裂纹拉伸试样断裂韧度与裂纹取向和裂纹扩展方向有关, 试样应以两个字母标记其取向。第一个字母表示裂纹面的法线方向, 第二个字母表示裂纹深度的预期扩展方向。例如,  $X-Z$  表示裂纹面的法线方向为纵向, 预期的裂纹扩展方向为板厚方向。标记方法如图 9-11 所示。

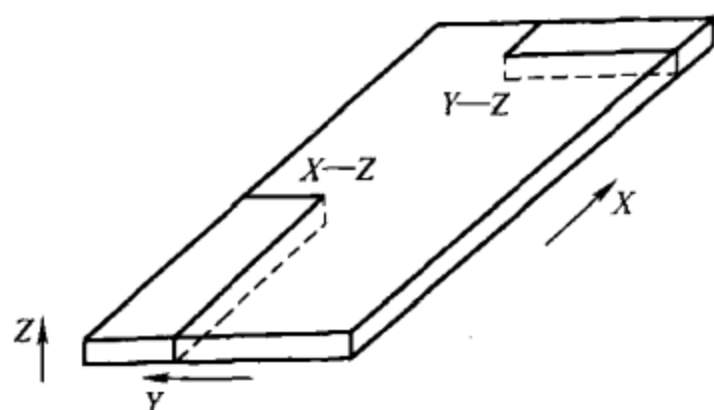


图 9-11 表面裂纹试样的取向标记  
X—长度方向（纵向） Y—宽度方向（横向）  
Z—板厚方向

3) 对于轧制板材试样, 应保留原轧制表面, 试样工作部分长度的表面不得有划伤、锈蚀等缺陷。如有特殊要求需要加工试样时, 应保留一侧原轧制表面, 并在该面预制裂纹, 加工面的表面粗糙度  $Ra$  的最大允许值为  $3.2\mu\text{m}$ 。

4) 为了便于预制疲劳裂纹, 一般在试样进行最终热处理之前, 用薄片的金刚石圆锯或类似的刀具和电火花机床在试样表面中部制造一个人造裂纹源。

5) 试样应尽可能在热处理之前预制疲劳裂纹。预制疲劳裂纹的深度应不小于  $0.25B$  或  $1.0\text{mm}$ , 取其较小者, 并且疲劳裂纹的扩展量应不小于最终裂纹长度的 5%。在疲劳预制裂纹前缘各点的法平面上, 裂纹及其加工裂纹源应位于裂纹前缘为顶点的  $30^\circ$  楔形区域内, 如图 9-12 所示。最小与最大循环应力之比不大于 0.1。

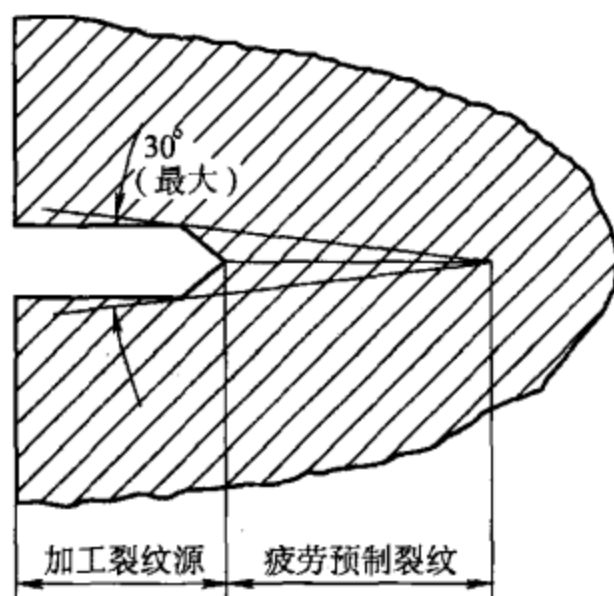


图 9-12 加工裂纹源及疲劳预制裂纹的包迹形状

## 9.3 断裂韧度试验设备

### 9.3.1 平面应变裂纹止裂断裂韧度试验装置

1) 在试验过程中, 为了减少附加能量的引入, 加载系统的柔度比试样柔度要低。为此使用了裂纹线上的楔形加载方式。

2) 加载装置如图 9-13 所示。试样放置在垫块上, 垫块应有足够厚度, 以避免楔块和试验机的下平台接触。垫块上的孔应与试样孔对正, 其孔的直径应是试样孔直径的  $1.05 \sim 1.15$  倍。试验机通过楔块对开口销施力, 并由加力系统中的力传感器测量所加的力。

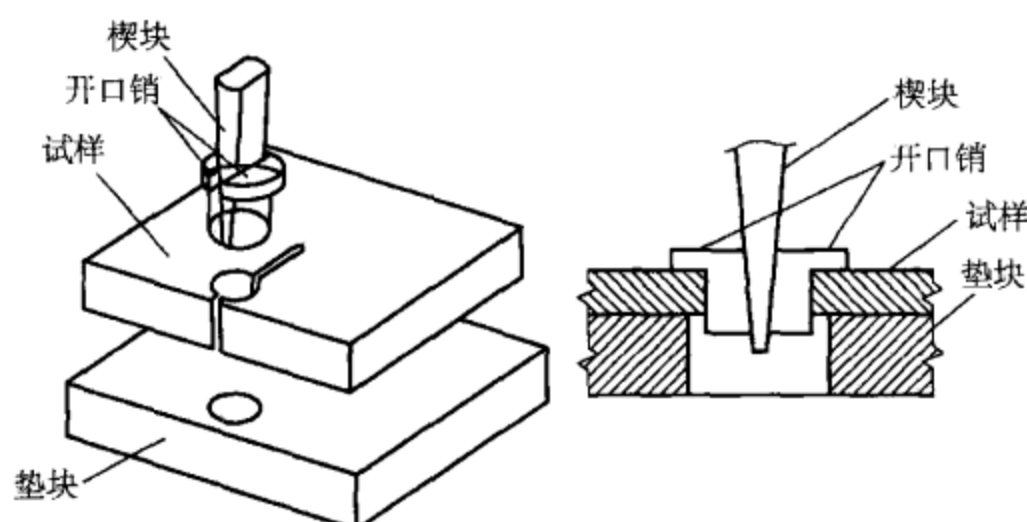


图 9-13 楔块、开口销、试样、垫块排列的示意图

3) 楔块、开口销、垫块孔和试样孔的表面都应该润滑, 可以使用油脂状二硫化钼或其他润滑剂。

4) 小锥度的楔块和开口销配合使用。用油脂或干润滑剂润滑滑动表面(喷丸处理)可以避免磨损, 开口销必须足够长, 保证与整个试样厚度范围相接触。开口销的直径应比试样孔的直径小 0.13mm。为了满足最大张开位移, 楔块必须足够长。空冷或油淬硬化的工具钢都适合制作楔块和开口销, 硬度范围为 45 ~ 55HRC。对于尺寸为  $125\text{mm} < W < 170\text{mm}$  的试样, 直径为 25.4mm 的孔是合适的。图 9-14 所示楔块和开口销的装配尺寸适合于直径为 25.4mm 的加载孔。也可以按比例机加工其他直径的孔。在试验温度远远高于无塑性转变温度时, 图 9-13 所示装置不能展示止裂的完整部分。在这种情况下, 应使用图 9-15 所示的加载装置。

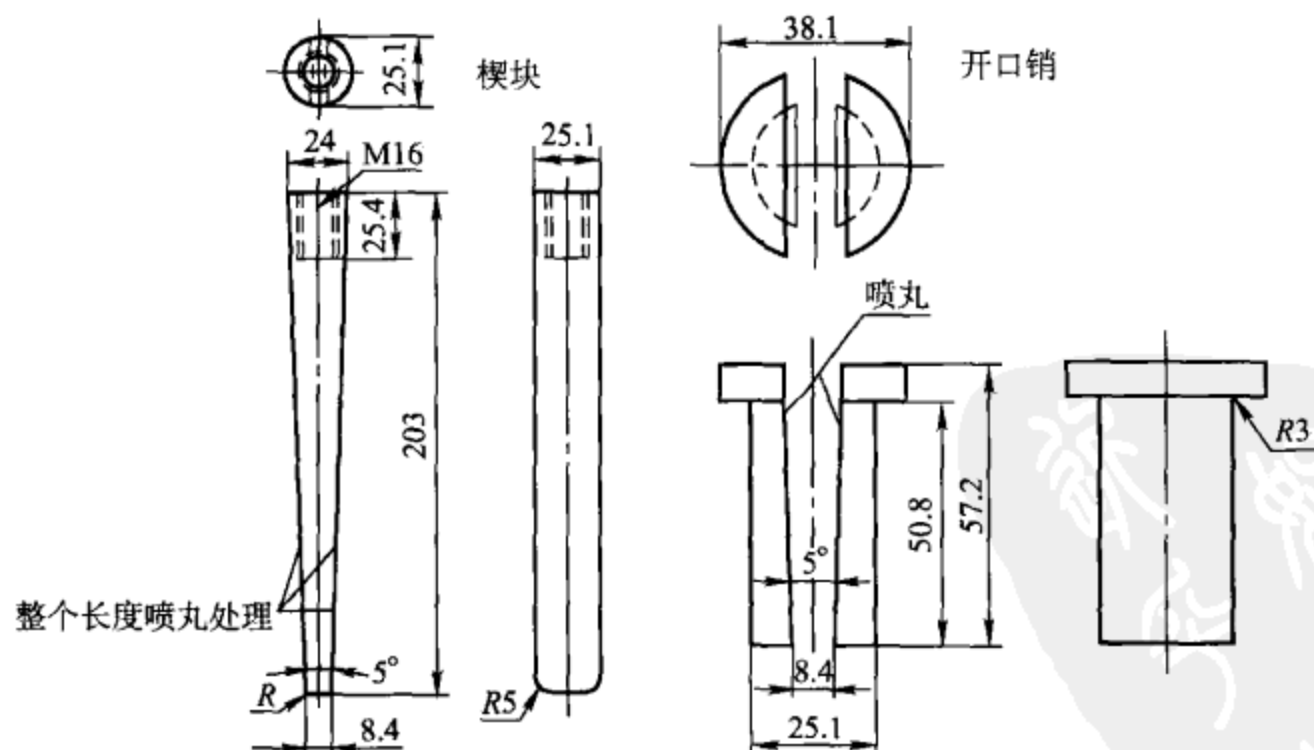


图 9-14 楔块和开口销的几何尺寸

5) 引伸计应不低于 2 级准确度。为了保证引伸计与试样安装接触的方式随裂纹扩展而不发生变化, 一般使用图 9-16 所示的两种方法。

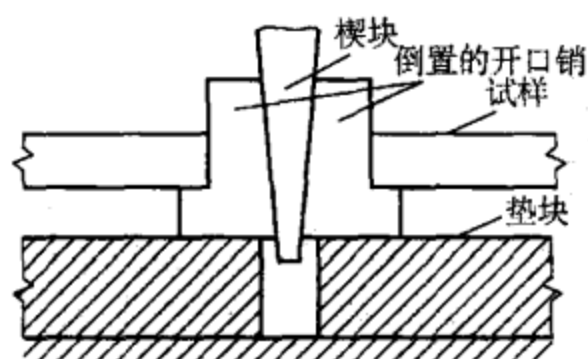


图 9-15 在较高温度下测定试样止裂韧度的加载装置的截面图

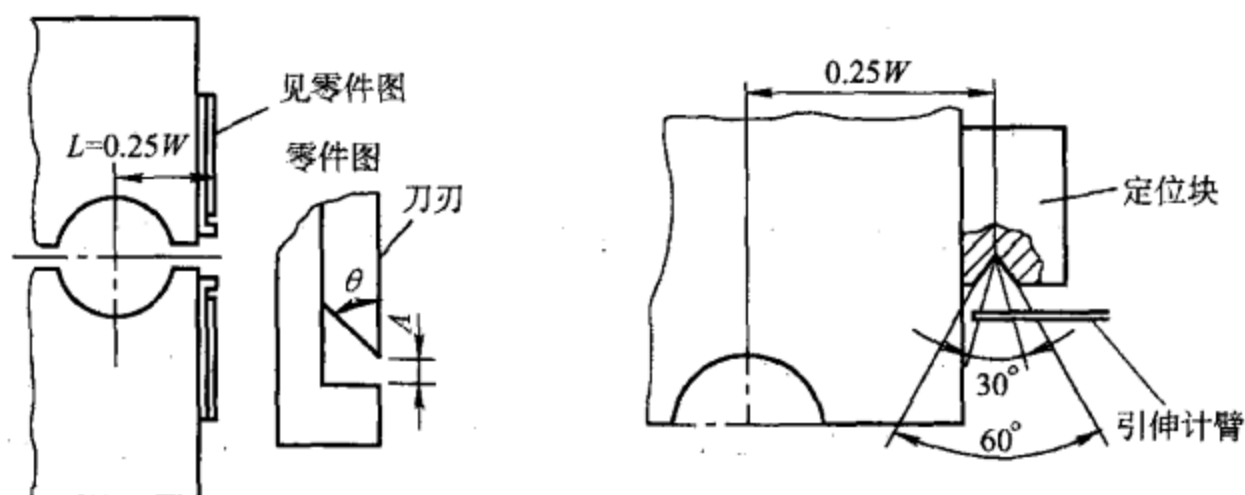


图 9-16 借助刀口和定位块的两两种引伸计的安装方式

注：A 的尺寸应比引伸计臂的厚度小 0.05 ~ 0.25mm。

### 9.3.2 表面裂纹拉伸断裂韧度试验装置

- 1) 采用的试验机应配有力-位移自动记录装置，并能够自动绘制曲线。
- 2) 引伸计应能准确测量表面裂纹中心处的裂纹前端张开位移。典型的测量装置如图 9-17 所示。

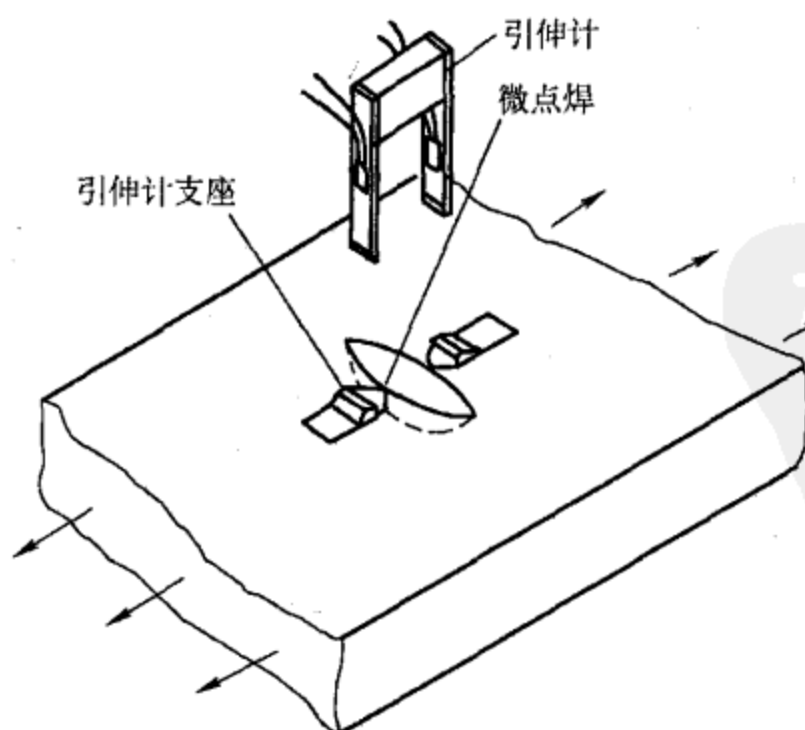


图 9-17 裂纹尖端张开位移典型的测量装置

9.3.3 其他断裂韧性试验装置

平面应变断裂韧性、延性断裂韧性、动态断裂韧性试验装置一般包括三点弯曲试验装置和紧凑拉伸试验装置。

1. 三点弯曲试验装置

三点弯曲试样使用的加载装置，在加载过程中允许支承辊自由向外移动，如图 9-18 所示，并保持整个试验过程中试样与辊的接触，以减少摩擦力的影响。辊的直径应在  $W/2 \sim W$  之间。加载装置受力面的硬度应大于 40HRC 或试样硬度，取其大者。

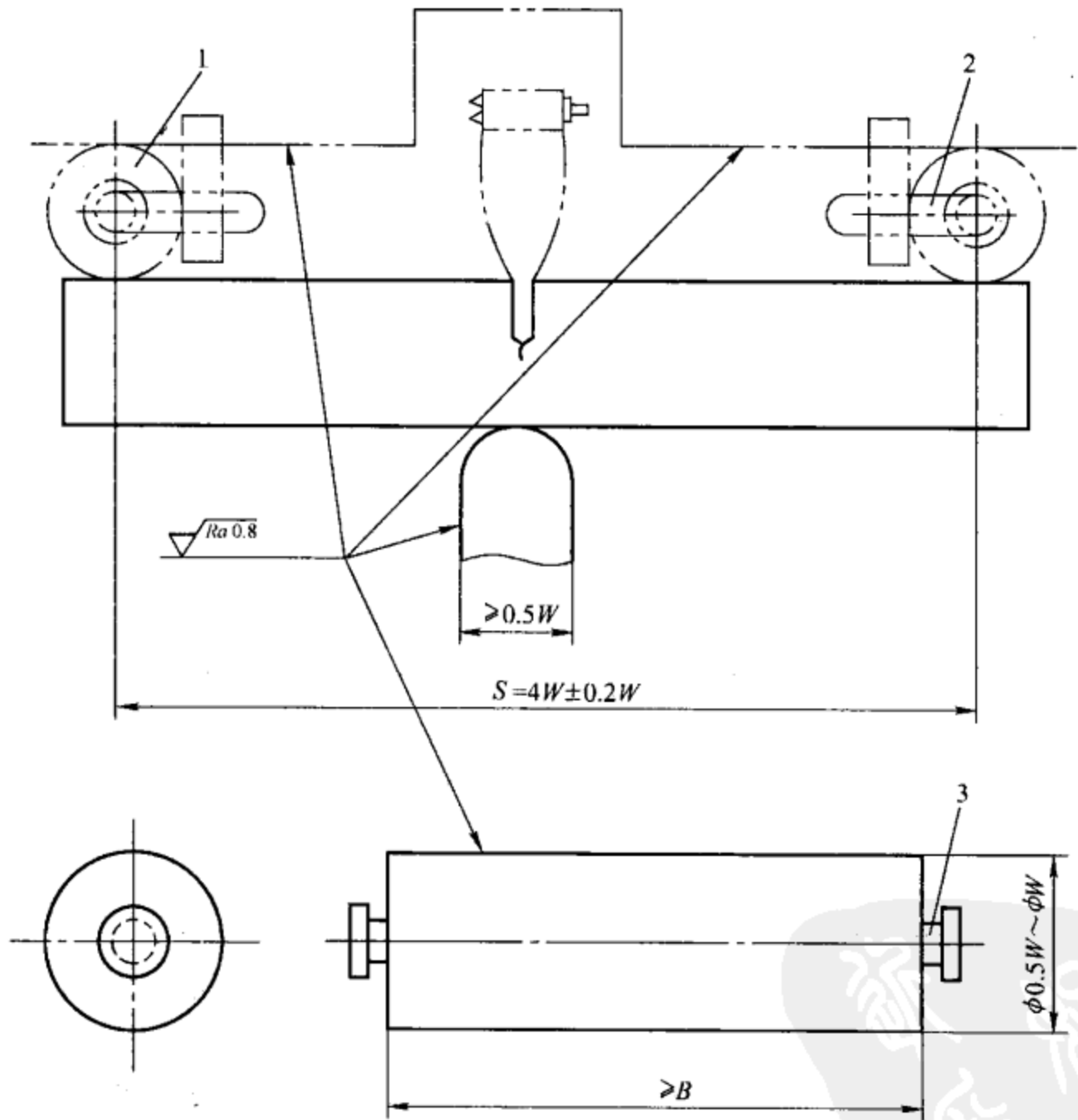


图 9-18 三点弯曲试验装置

1—辊 2—橡皮筋或弹簧 3—固定橡皮筋或弹簧的箍  
 $W$ —试样宽度 (mm)  $B$ —试样厚度 (mm)

2. 紧凑拉伸试验装置

紧凑拉伸试样加载时使用的 U 形钩和加载销应尽量减小摩擦。试样在受拉力

作用时, 试验装置应保证同轴。用于测定阻力曲线的 U 形钩的销孔应是平底的 (见图 9-19), 以保证加载销在整个加载过程能自由转动。圆底销孔的 U 形钩 (见图 9-20) 不允许用于单试样法 (卸载柔度) 的试验。

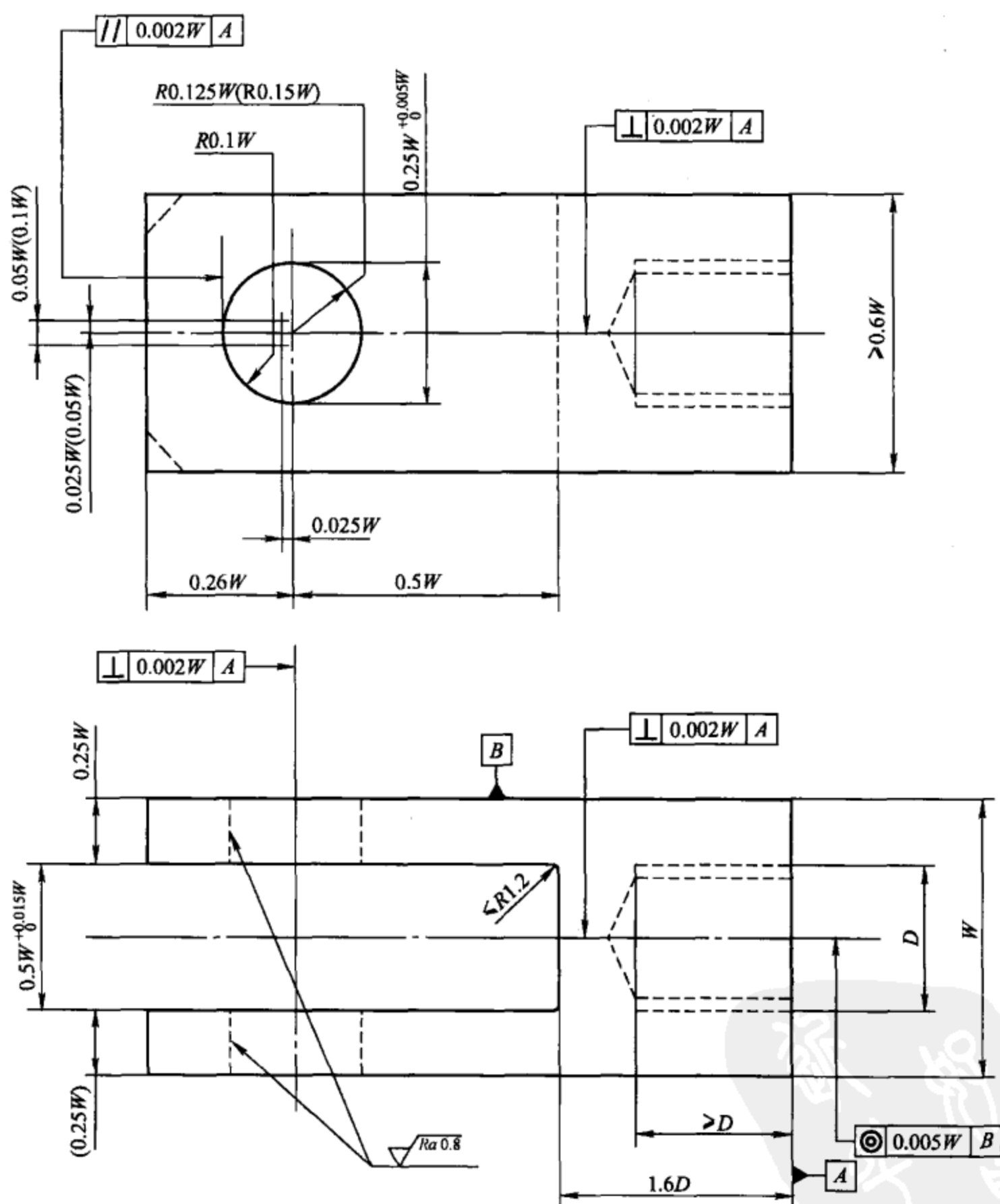


图 9-19 用于紧凑拉伸试样的平底加载销孔 U 形钩的典型设计

注: 1. 加载销的直径  $= 0.24W \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.005W \end{smallmatrix}$ 。

2. U 形钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度, 取其大者。

3. 对于大位移量的试样, U 形钩销孔的直径应放大到括号内的尺寸。

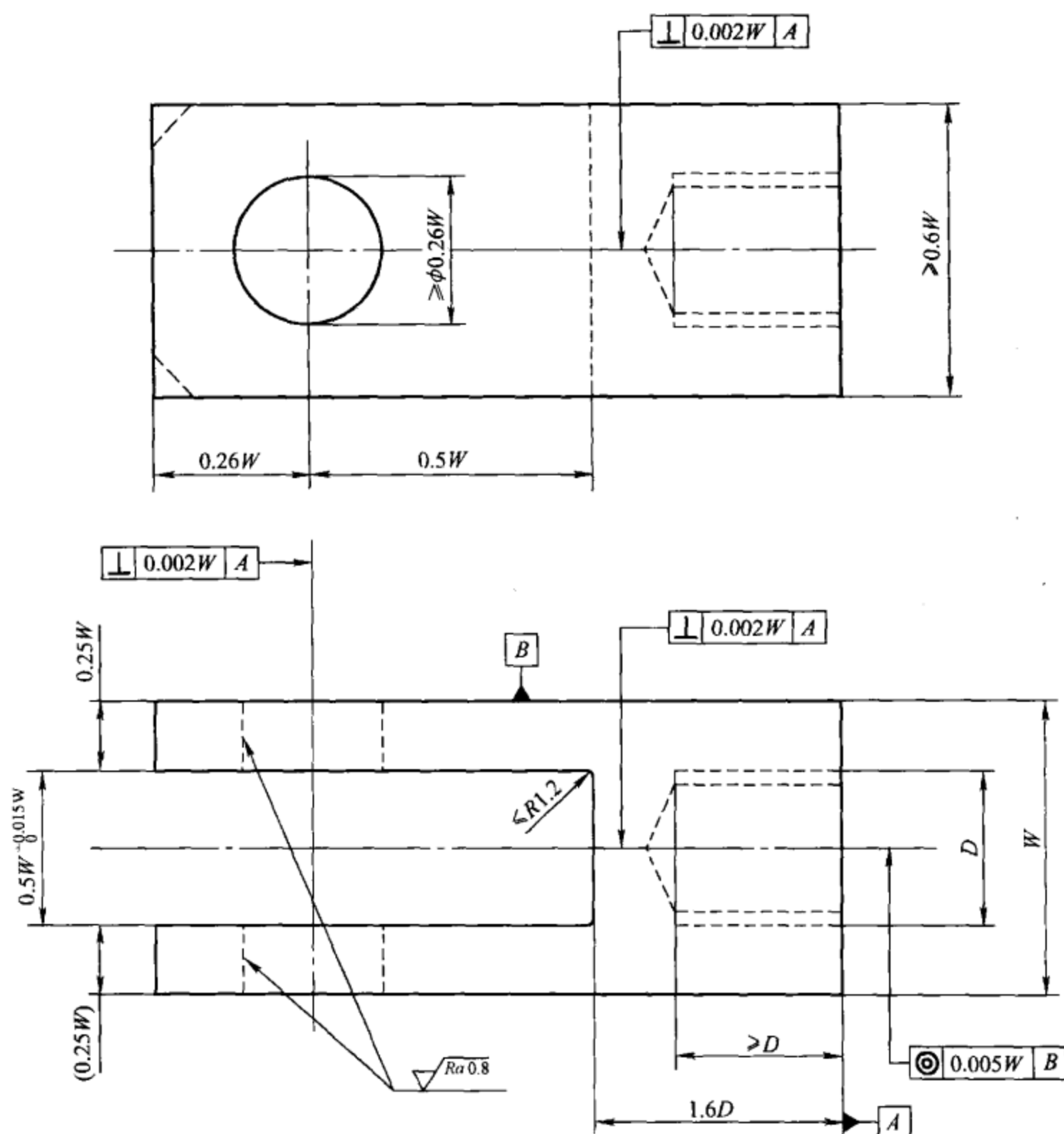


图 9-20 用于紧凑拉伸试样的圆底加载销孔 U 形钩的典型设计

注：1. 加载销的直径  $= 0.24W \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.005W \end{smallmatrix}$ 。

2. U 形钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度，取其大者。

## 9.4 试验要求

- 1) 每个试验温度下，应不少于三个有效试验结果。
- 2) 测量试样宽度  $W$  应准确到宽度  $W$  的  $\pm 1\%$  以内。
- 3) 测量试样厚度  $B$  和裂纹平面的净厚度  $B_N$ ，准确到厚度  $B$  的  $\pm 1\%$  以内。
- 4) 试样通过适当方法加热或冷却到选定的试验温度。对于室温 ( $10 \sim 35^\circ\text{C}$ ) 以上温度的试验，可采用电阻加热方法。对于室温以下温度的试验，可采用将试样放置于低温环境箱的方法 (见图 9-21)，或者将试样浸泡于冷却介质中的方法。在

开始试验之前, 试样要在试验温度下要保持足够长的时间, 以使试样的温度均匀。温度最大允许偏差  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

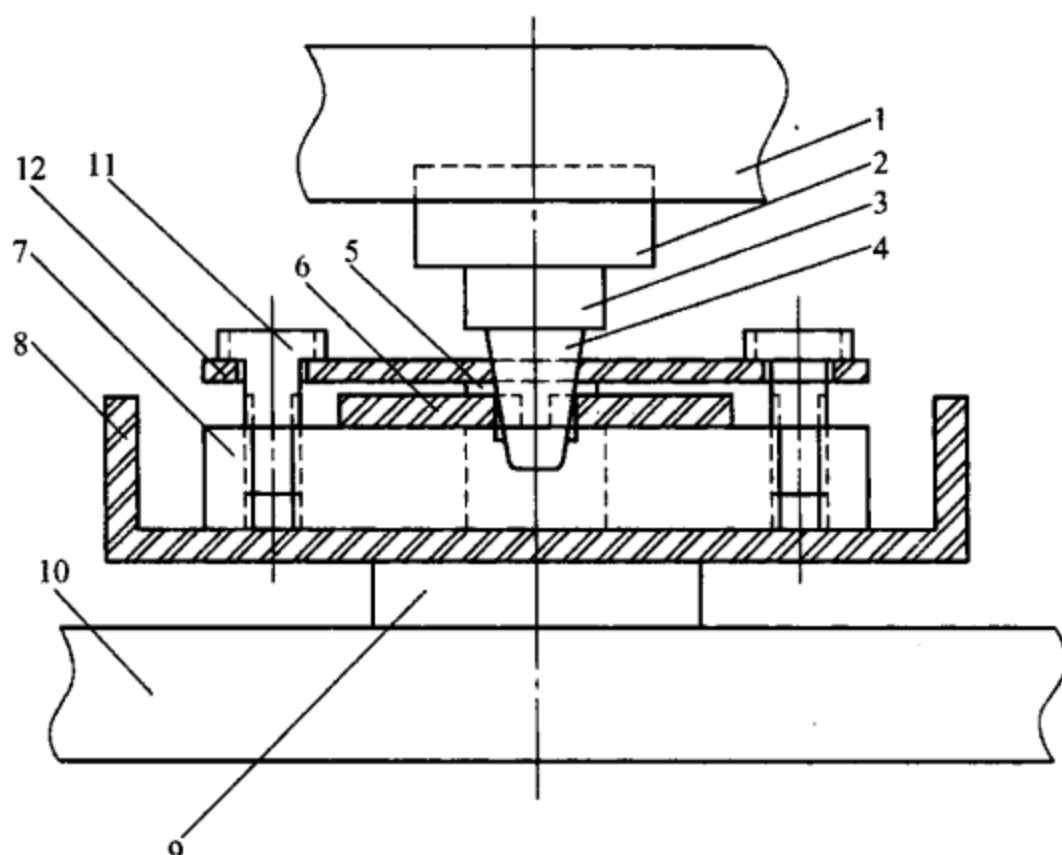


图 9-21 利用循环加载技术便于楔块抽拔的加载装置

1—上横梁 2—力传感器 3—拉压夹头 4—楔块 5—开口销 6—试样  
7—垫块 8—恒温箱 9—下夹头 10—下平台 11—螺钉 12—压板

5) 非室温条件下的断裂韧性试验, 试验温度应控制在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 并作记录。应在距离裂纹尖端 5mm 以内的区域用热电偶或铂电阻温度计与试样表面接触进行温度测量。试验应在适当的低温或高温介质中进行。冷却介质为液体时, 要使试样表面温度达到试验温度, 每 1mm 厚度浸泡时间至少 30s。冷却介质为气体时, 每 1mm 厚度保温时间至少 60s。试样在试验温度下的浸泡时间最少 15min。试样温度在试验过程中应保持在名义试验温度的  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  以内, 并按要求记录。

## 9.5 断裂韧度的测定

### 9.5.1 平面应变裂纹止裂断裂韧度的测定

#### 1. 试验原理

(1) 动态裂纹止裂断裂韧度  $K_A$  当结构存在断裂韧度或应力梯度时, 裂纹可能在低断裂韧度或高应力区启裂或在两者共存的条件下启裂, 在高断裂韧度或低应力区或两者共存的另一区域止裂。一个快速扩展裂纹在很短的时间间隔内止裂时的应力强度因子值是衡量裂纹在该种材料上的止裂能力的。这种应力强度因子  $K$  值



是使用动态分析方法确定的, 定义为动态裂纹止裂断裂韧性值  $K_{Id}$ 。

(2) 静态裂纹止裂断裂韧性  $K_{Is}$ 。静态分析方法比较简单, 可以在裂纹止裂后约 1~2ms 之内确定  $K$  值, 这种方式得到的应力强度因子  $K$  值定义为静态裂纹止裂断裂韧性  $K_{Is}$ , 简称裂纹止裂断裂韧性  $K_{Is}$ 。

(3) 平面应变裂纹止裂断裂韧性  $K_{Ia}$ 。当宏观动态效应较小时,  $K_{Id}$  和  $K_{Is}$  之间的差别很小, 可以认为  $K_{Id} \approx K_{Is}$ 。当裂纹前端处于平面应变的条件时, 裂纹扩展的动态效应也很小, 借助符合试验尺寸的试样进行试验, 就可以得到裂纹发生止裂时的平面应变止裂断裂韧性条件值  $K_{Qa}$ , 如果  $K_{Qa}$  符合相关的有效性判据, 则可认定  $K_{Qa}$  值为平面应变裂纹止裂断裂韧性  $K_{Ia}$ 。

## 2. 加载程序

1) 使用循环加载技术, 即力施加给楔块, 直至快速裂纹启裂或裂纹嘴张开位移 (引伸计测量) 达到预定的值。如果在最大张开位移达到之前, 快速断裂还没有开始, 就要对试样卸载, 直至楔块退离开口销; 然后再以同样的方式对试样加载, 直至裂纹快速开裂或达到设定的最大张开位移。在每一个加载循环中, 允许依次施加较大的张开位移, 直至裂纹快速开裂或试验结束。

2) 记录力-裂纹张开位移图, 不同加载循环之间的记录不要清零, 因为累加的零载荷位移偏置对后面的计算是有用的。

3) 对楔块施力, 直至引伸计测量的裂纹张开位移达到下式的最大值:

$$[(V_0)_1]_{\max} = \frac{0.69 R_{p0.2} W \sqrt{B_N/B}}{E f(a_0/W)}$$

式中  $V_0$ ——起始位移, 单位为 mm;

$R_{p0.2}$ ——规定非比例延伸强度, 单位为  $N/mm^2$ ;

$W$ ——试样宽度, 单位为 mm;

$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$B_N$ ——试样净厚度, 单位为 mm;

$E$ ——弹性模量, 单位为  $N/mm^2$ ;

$a_0$ ——试样缺口长度, 单位为 mm;

$f(a_0/W)$ ——自变量为  $a_0/W$  的函数。

在位移控制状态下操作试验机, 横梁的位移速度为 2~12mm/min。

4) 拔出楔块对试样卸载, 准备第二个加载循环。引伸计应保持不动, 在卸载和楔块移动过程中, 记录零载荷时的位移偏置。

5) 不要对记录清零, 重新插入楔块并对楔块施力, 以与第一循环相同的位移速率进行加载。继续加载直至快速裂纹扩展发生或直至位移达到预定的最大值。推荐的最大张开位移在第二循环和随后的循环按下式计算:

$$[(V_0)_n]_{\max} = [1.0 + 0.25(n-1)] \left[ \frac{0.69R_{\text{PO.2}} W \sqrt{B_N/B}}{Ef(a_0/W)} \right]$$

式中  $V_0$ ——起始位移, 单位为 mm;

$n$ ——循环的次序号;

$R_{\text{PO.2}}$ ——规定非比例延伸强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$W$ ——试样宽度, 单位为 mm;

$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$B_N$ ——试样净厚度, 单位为 mm;

$E$ ——弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$a_0$ ——试样缺口长度, 单位为 mm;

$f(a_0/W)$ ——自变量为  $a_0/W$  的函数。

如果在达到预定位移极限时, 不稳定裂纹扩展没有开始, 要重新卸载并按 4) 步骤拔出楔块, 记录不同加载循环下的力-位移曲线图, 按 4) 重复试验。如果要多次进行加载和卸载, 需要重新对楔块和开口销进行润滑。

6) 在试验记录的曲线图上看见一个突然的力下降 (力下降 50% ~ 60%, 表明产生了足够长的不稳定裂纹), 即可以判断不稳定裂纹的产生。止裂发生后, 应该立即卸掉载荷, 避免裂纹进一步扩展。

7) 如果在随后的加载循环中, 增加张开位移的同时伴随着力的降低, 那就意味已发生稳定撕裂, 试样快速止裂是不可能的。在这种情况下应停止试验, 需要重新对试样进行机加工, 去掉焊珠和缺口顶端已发生塑性变形的材料, 机加工新的缺口。为了从该试样获得有效数据, 需要在更低的温度下重新试验 (降低 20 ~ 40℃)。若位移超过按下式估计的极限, 试验就不可能得到成功的结果了。

$$(V_0)_{\text{limit}} = \frac{1.50R_{\text{PO.2}} W \sqrt{B_N/B}}{Ef(a_0/W)}$$

式中  $V_0$ ——起始位移, 单位为 mm;

$R_{\text{PO.2}}$ ——规定非比例延伸强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$W$ ——试样宽度, 单位为 mm;

$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$B_N$ ——试样净厚度, 单位为 mm;

$E$ ——弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$a_0$ ——试样缺口长度, 单位为 mm;

$f(a_0/W)$ ——自变量为  $a_0/W$  的函数。

未试验成功的试样必须去掉的材料数量大约是缺口尖端附近处于平面应变条件的塑性区的半径, 根据  $(K_0/R_{\text{PO.2}})^2/(6\pi)$  计算得到, 其中  $K_0$  是裂纹启裂应力强度

因子, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ 。必须通过机加工去掉已发生稳态撕裂的足够量的材料。

### 3. 标记止裂裂纹

1) 止裂裂纹的位置通过热着色来标记, 通过在  $260 \sim 370^\circ\text{C}$  温度范围, 加热时间  $10 \sim 90\text{min}$  标记止裂裂纹前缘, 可以将时间与温度任意组合。

2) 标记完试样的裂纹前缘后, 应将试样断成两半, 通常需要借助楔形加载装置。对于结构钢可以通过干冰或液氮冷却加速断裂过程。

### 4. 止裂裂纹长度的测量

在热着色的断口试样厚度中心、中心和侧槽的  $1/2$  厚度处等三个位置测量止裂裂纹长度, 准确到  $\pm 1\%$  以内。由于裂纹前缘的不规则性, 在某些位置测量裂纹长度是困难的, 此时应取这三个位置为中心, 宽为  $B_N/4$  上的视觉平均值。三次测量的平均值规定为止裂裂纹长度  $a_a$ 。

视觉平均避免了单点测量, 单点测量不能准确代表裂纹前缘附近测量的平均位置。为了便于分析, 先假定裂纹前缘是平直和光滑的。视觉平均方法是以在测量带的宽度上取平均值作为裂纹尖端位置的 (已断材料和未断材料的分界)。视觉平均方法具有一定程度的保守性, 这是因为该方法计算的应力强度因子随裂纹长度的增加而降低。

### 5. 试验结果的计算和处理

(1) 位移测量 从力-位移 ( $F-V$ ) 自动记录曲线图上, 确定几个位移值。图 9-22 是通过对试样连续加载和卸载循环得到的典型力-位移图, 直到第四个加载循环, 才显示出不稳定裂纹扩展。需要测量的位移如下:

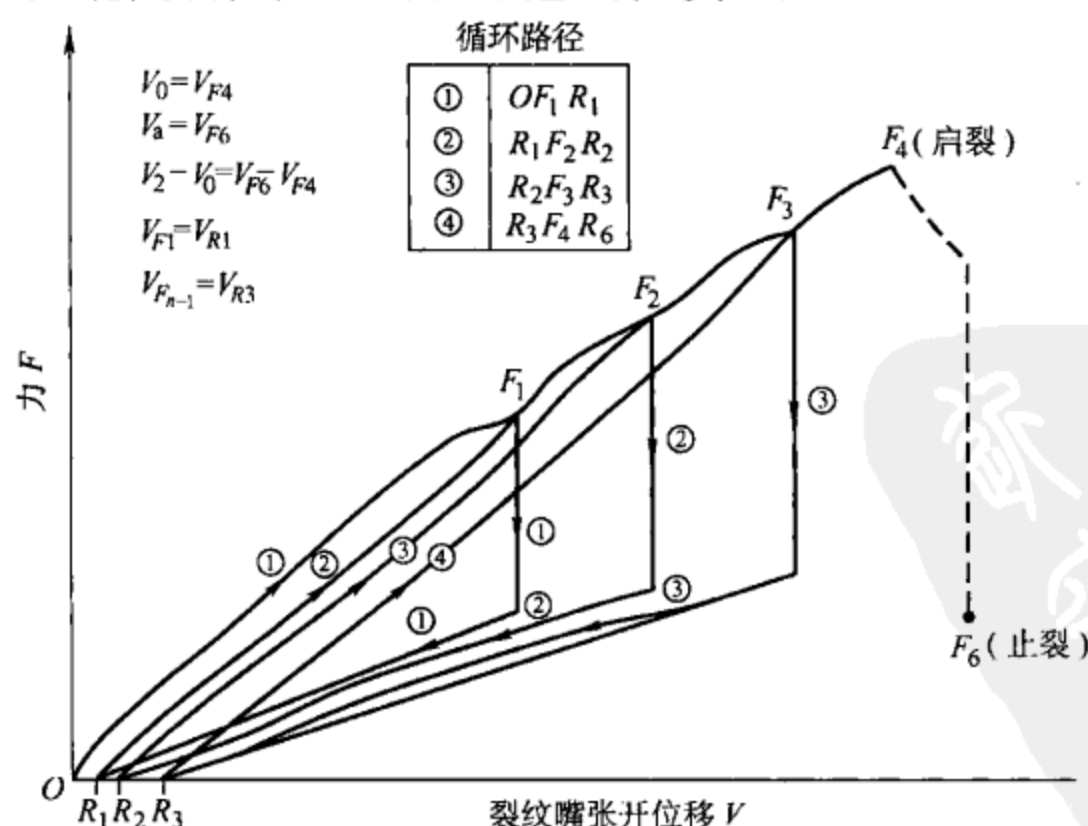


图 9-22 对试样使用循环加载技术得到的力-位移图  
(在第四个加载周期显示了快速止裂)

- 1)  $V_{F_1}$  = 第 1 个加载循环结束时的位移偏置 =  $V_{R_1}$ 。
- 2)  $V_{F_{n-1}}$  = 第  $n-1$  个加载循环结束时的总位移偏置 = 最后加载循环起始时的总位移偏置 =  $V_{R_3}$ 。
- 3)  $V_0$  = 不稳定裂纹扩展起始的位移 =  $V_{F_4}$ 。
- 4)  $V_a$  = 裂纹止裂后大约 0.1s 的位移 =  $V_{F_5}$  ( $V_a$  定义为裂纹止裂以后大约 2ms 时的张开位移。然而, 不能使用仪器测量。试验操作假定  $V_a$  在裂纹止裂后 2ms 到 100ms 没有明显区别)。
- 5)  $V_a - V_0$  = 止裂伴随的裂纹张开的快速增加 =  $V_{F_5} - V_{F_4}$ 。

(2)  $K_0$  和  $K_{Qa}$  的计算 裂纹启裂应力强度因子  $K_0$  ( $N/mm^{3/2}$ ) 和平面应变止裂断裂韧性条件值  $K_{Qa}$  ( $N/mm^{3/2}$ ) 按公式计算。

$$K = EVf(x)(B/B_N)^{1/2}/W^{1/2}$$

式中  $K$ ——应力强度因子, 单位为  $N/mm^{3/2}$ ;  
 $E$ ——弹性模量, 单位为  $N/mm^2$ ;  
 $V$ ——位移, 单位为 mm;  
 $W$ ——试样宽度, 单位为 mm;  
 $B$ ——试样厚度, 单位为 mm;  
 $B_N$ ——试样净厚度, 单位为 mm;  
 $f(x)$ ——自变量为  $x$  的函数, 其中  $x$  按下式计算:  
$$x = a/W$$

式中  $a$ ——止裂裂纹长度, 单位为 mm;  
 $W$ ——试样宽度, 单位为 mm。

不同的  $x$  对应的  $f(x)$  值如表 9-1 所示。

表 9-1 不同的  $x$  对应的  $f(x)$  值

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
0.20	0.390	0.29	0.302	0.38	0.243
0.21	0.378	0.30	0.294	0.39	0.237
0.22	0.367	0.31	0.287	0.40	0.232
0.23	0.357	0.32	0.280	0.41	0.227
0.24	0.347	0.33	0.273	0.42	0.223
0.25	0.337	0.34	0.266	0.43	0.218
0.26	0.328	0.35	0.260	0.44	0.214
0.27	0.319	0.36	0.254	0.45	0.210
0.28	0.310	0.37	0.248	0.46	0.206

(续)

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
0.47	0.202	0.60	0.160	0.73	0.125
0.48	0.198	0.61	0.158	0.74	0.122
0.49	0.194	0.62	0.155	0.75	0.119
0.50	0.191	0.63	0.152	0.76	0.117
0.51	0.188	0.64	0.149	0.77	0.114
0.52	0.184	0.65	0.147	0.78	0.111
0.53	0.181	0.66	0.144	0.79	0.108
0.54	0.178	0.67	0.141	0.80	0.105
0.55	0.175	0.68	0.139	0.81	0.102
0.56	0.172	0.69	0.136	0.82	0.098
0.57	0.169	0.70	0.133	0.83	0.095
0.58	0.166	0.71	0.131	0.84	0.092
0.59	0.163	0.72	0.128	0.85	0.088

1) 使用  $a = a_0$ ,  $V = V_0 - V_{F_{n-1}}$  计算  $K_0$ 。

2) 使用  $a = a_a$ ,  $V = 0.5[V_0 + V_a - V_{F1} - V_{F_{n-1}}]$  计算  $K_{Qa}$ 。如果在第一加载循环, 就发生了快速止裂,  $V_{F_{n-1}}$  和  $V_{F1}$  均取值为零。

(3) 有效性判据 按计算得到的  $K_{Qa}$  值, 如果完全满足表 9-2 的判据, 就认为是平面应变止裂韧性值  $K_{Ia}$ 。

表 9-2 保证  $K_{Qa}$  是线弹性平面应变止裂韧性值的判据

特 征	判 据	特 征	判 据
未断韧带	(A) $W - a_a \geq 0.15W$	裂纹扩展量	(D) $a_a - a_0 \geq 2W_N$
未断韧带	(B) $W - a_a \geq 1.25(K_a/R_{Yd})^2$	裂纹扩展量	(E) $a_a - a_0 \geq (K_0/R_{P0.2})^2/2\pi$
厚度	(C) $B \geq 1.0(K_a/R_{Yd})^2$		

注:  $W_N$  是缺口宽度, 单位为 mm;  $R_{Yd}$  是动态屈服强度, 单位为  $N/mm^2$ 。

## 9.5.2 平面应变断裂韧度的测定

### 1. 试验原理

使用预制疲劳裂纹试样, 通过增加力来测定金属材料的断裂韧性 ( $K_{IC}$ ), 力与缺口张开位移可以自动记录, 也可以将数据储存到计算机。根据对试验记录的线性部分规定的偏离来确定 2% 最大宏观裂纹扩展量所对应的力, 根据这个力计算出  $K_{IC}$ 。

$K_{IC}$ 表征了在严格拉伸力约束下有尖端裂纹存在时材料的断裂抗力。此时裂纹尖端附近的应力状态接近于平面应变状态，裂纹尖端塑性区的尺寸比裂纹尺寸、试样厚度和裂纹前沿的韧带尺寸要足够小。 $K_{IC}$ 通常情况下代表了试验温度下断裂韧度的下限值。

## 2. 断裂韧度 $K_{IC}$ 试样疲劳裂纹的预制

预制疲劳裂纹时可以采用力控制，也可以采用位移控制。最小循环应力与最大循环应力之比 ( $R$ ) 应不超过 0.1，如果  $K_{IC}$  的条件值  $K_Q$  和有效的  $K_{IC}$  结果相等，那么预制疲劳裂纹时的最大应力强度因子应不超过后面试验确定的  $K_Q$  值的 80%。在预制疲劳预裂纹的最后阶段（裂纹长度  $a$  的 2.5%），预制疲劳裂纹时的最大应力强度因子  $K_f$  应不超过  $K_Q$  值的 60%。若疲劳预裂纹和断裂试验在不同的温度下进行， $K_f$  应不超过  $0.6[(R_{p0.2})_p/(R_{p0.2})_t]K_Q$ ，其中  $(R_{p0.2})_p$  和  $(R_{p0.2})_t$  分别为预制疲劳裂纹温度下和试验温度下的规定非比例延伸强度  $R_{p0.2}$ 。

## 3. 三点弯曲试样试验

1) 试样缺口的中心对准两个支撑辊中心距的中点，准确到跨距的 1%，同时应与支撑辊垂直，偏差在  $\pm 2^\circ$  以内。

2) 弯曲试样  $K_Q$  值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q S / (BW^{3/2})] \times f(a/W)$$

式中  $K_Q$ —— $K_{IC}$  的条件值，单位为  $N/mm^{3/2}$ ；

$F_Q$ ——特定的力值，单位为 N；

$S$ ——弯曲试样跨距，单位为 mm；

$B$ ——试样厚度，单位为 mm；

$W$ ——试样宽度，单位为 mm；

$a$ ——裂纹长度，单位为 mm；

$f(a/W)$ ——自变量为  $a/W$  的函数，其值可用下式计算：

$$f(a/W) = 3(a/W)^{1/2} \times \frac{1.99 - (a/W)(1 - a/W)[2.15 - 3.93(a/W) + 2.70(a/W)^2]}{2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}}$$

## 4. 紧凑拉伸试样试验

1) 为了使加力时偏心最小，加力杆中心线偏差应在  $\pm 0.75\text{mm}$  以内。

2) 紧凑拉伸试样的  $K_Q$  值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q / (BW^{1/2})] \times f(a/W)$$

式中  $K_Q$ —— $K_{IC}$  的条件值，单位为  $N/mm^{3/2}$ ；

$F_Q$ ——特定的力值，单位为 N；



$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$W$ ——试样宽度, 单位为 mm;

$a$ ——裂纹长度, 单位为 mm;

$f(a/W)$ ——自变量为  $a/W$  的函数, 其值可用下式计算:

$$f(a/W) = (2 + a/W) \times \frac{0.866 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4}{(1 - a/W)^{3/2}}$$

### 5. C 形拉伸试样试验

1) 安装 U 形钩, 上、下加力杆中心线偏差在 0.76mm 以内。试样应位于 U 形钩的正中, 偏差在 0.76mm 以内。

2) C 形拉伸试样的  $K_Q$  值按下式计算:

$$K_Q = [F_Q / (BW^{1/2})] (3X/W + 1.9 + 1.1a/W) \times [1 + 0.25(1 - a/W)^2(1 - r_1/r_2)] f(a/W)$$

式中  $K_Q$ —— $K_{IC}$  的条件值, 单位为  $N/mm^{3/2}$ ;

$F_Q$ ——特定的力值, 单位为 kN;

$B$ ——试样厚度, 单位为 cm;

$W$ ——试样宽度, 单位为 cm;

$a$ ——裂纹长度, 单位为 cm;

$X$ ——加力孔偏置尺寸, 单位为 cm;

$r_1/r_2$ ——内外半径比;

$f(a/W)$ ——自变量为  $a/W$  的函数, 其值可用下式计算:

$$f(a/W) = [(a/W)^{1/2} / (1 - a/W)^{3/2}] \times [3.74 - 6.30a/W + 6.32(a/W)^2 - 2.43(a/W)^3]$$

### 6. 圆形紧凑拉伸试样试验

1) 安装 U 形钩, 上、下加力杆中心线偏差在 0.76mm 以内, 试样应位于 U 形钩的正中, 偏差在 0.76mm 以内。

2) 圆形紧凑拉伸试样的  $K_Q$  值按下式计算:

$$K_Q = [F_Q / (BW^{1/2})] \times f(a/W)$$

式中  $K_Q$ —— $K_{IC}$  的条件值, 单位为  $N/mm^{3/2}$ ;

$F_Q$ ——特定的力值, 单位为 kN;

$B$ ——试样厚度, 单位为 cm;

$W$ ——试样宽度, 单位为 cm;

$a$ ——裂纹长度, 单位为 cm;

$f(a/W)$ ——自变量为  $a/W$  的函数, 其值可用下式计算:



$$f(a/W) =$$

$$\frac{(2 + a/W)[0.76 + 4.8(a/W) - 11.58(a/W)^2 + 11.43(a/W)^3 - 4.08(a/W)^4]}{(1 - a/W)^{3/2}}$$

## 7. 试验结果的计算与解释

(1)  $F_Q$  的确定 如果采用记录仪, 确定条件值  $F_Q$  的方法如下:

1) 在试验记录上, 通过原点画一条斜率为  $(F/V)_s = 0.95(F/V)_0$  的割线  $OF_s$  (如图 9-23 所示), 其中  $(F/V)_0$  是记录的线性部分切线  $OA$  的斜率。

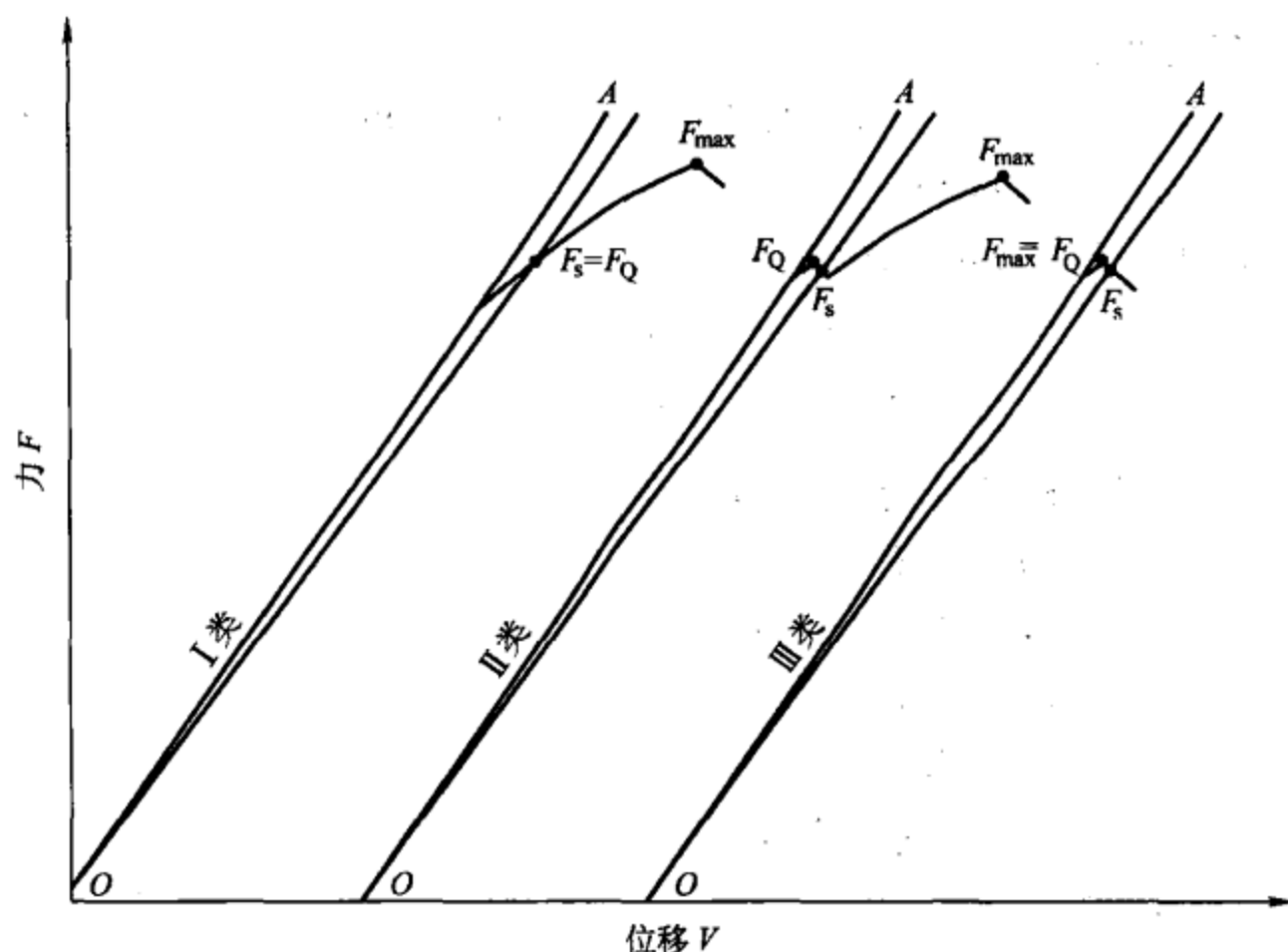


图 9-23 典型的力-位移记录曲线

- 2) 如果在  $F_s$  之前记录曲线上每一个点的力均低于  $F_s$  (I 类), 则取  $F_Q = F_s$ 。
- 3) 如果在  $F_s$  之前还有一个最大力超过  $F_s$  (II 类和 III 类), 则取这个力为  $F_Q$ 。
- 4) 如果采用计算机数据采集系统, 和上面一样, 通过数据缩减程序可确定相同的力 ( $F_Q$  和  $F_{max}$ )。

(2)  $K_{IC}$  的确定 计算比值  $F_{max}/F_Q$ , 其中  $F_{max}$  为最大力。

1) 如果该比值不超过 1.10, 则可按 (1) 中所述公式计算  $K_Q$ ; 若比值大于 1.10, 则该试验不是有效  $K_{IC}$  试验。

2) 计算  $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$ 。若这个值小于试样厚度、裂纹长度和韧带尺寸, 则  $K_Q$  等于  $K_{IC}$ ; 否则, 该项试验不是有效的  $K_{IC}$ 。

## 8. 断口形貌观察

典型断口形貌有部分斜断口、大部分斜断口和全部斜断口, 如图 9-24 所示。

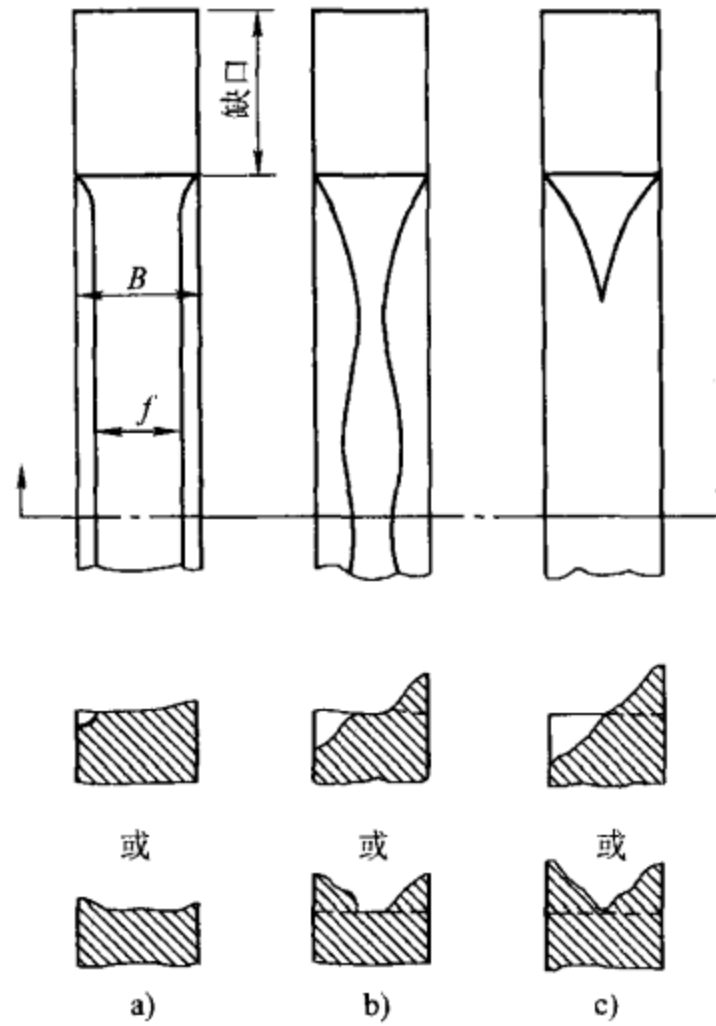


图 9-24 典型的断口形貌

a) 部分斜断口 b) 大部分斜断口 c) 全部斜断口

### 9.5.3 表面裂纹拉伸断裂韧度的测定

#### 1. 断裂试验

1) 采用拉伸连续加力方式进行断裂试验，应保证名义应力  $[F/(BW)]$ ，其中  $F$  是试验力，单位为 N； $B$  是试样厚度，单位为 mm； $W$  是试样宽度，单位为 mm] 速率小于  $690\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min})$ 。

2) 试样装夹引伸计后，应在约  $0.3R_{p0.2}BW$  力以下反复加力 1~2 次，自动记录力-位移 ( $F-V$ ) 曲线，调整记录装置的放大倍数，使曲线线性部分的斜率在 1~3 之间。

3) 对试样连续加力至断裂，同时记录  $F-V$  曲线和试验中达到的最大力  $F_{\max}$ 。

4) 测量裂纹深度  $a$  和长度  $2c$ ，精确到 0.01mm。

#### 2. 条件力 $F_Q$ 的确定

1) 试验可能出现如图 9-25 所示的三种典型的  $F-V$  曲线。

2) 在  $F-V$  曲线上，通过原点  $O$  作割线  $OD$ ，割线  $OD$  的斜率比初始切线  $OA$  的斜率降低 15%，并与  $F-V$  曲线相交于  $F$  点，与  $F$  点对应的力为  $F_{15}$ 。当  $F_{15}$  以前

曲线所对应的  $F_{\max}$  (或  $F_1$ ) 大于或等于  $F_{15}$  时 (图 9-25 中曲线 I 和 II), 则  $F_Q = F_{\max}$  (或  $F_1$ )。当  $F_{15}$  以前的曲线上任意一点所对应的力均低于  $F_{15}$  时 (图 9-25 中曲线 III), 则  $F_Q = F_{15}$ 。一般来说,  $F_{15}$  对应于裂纹的条件启裂。

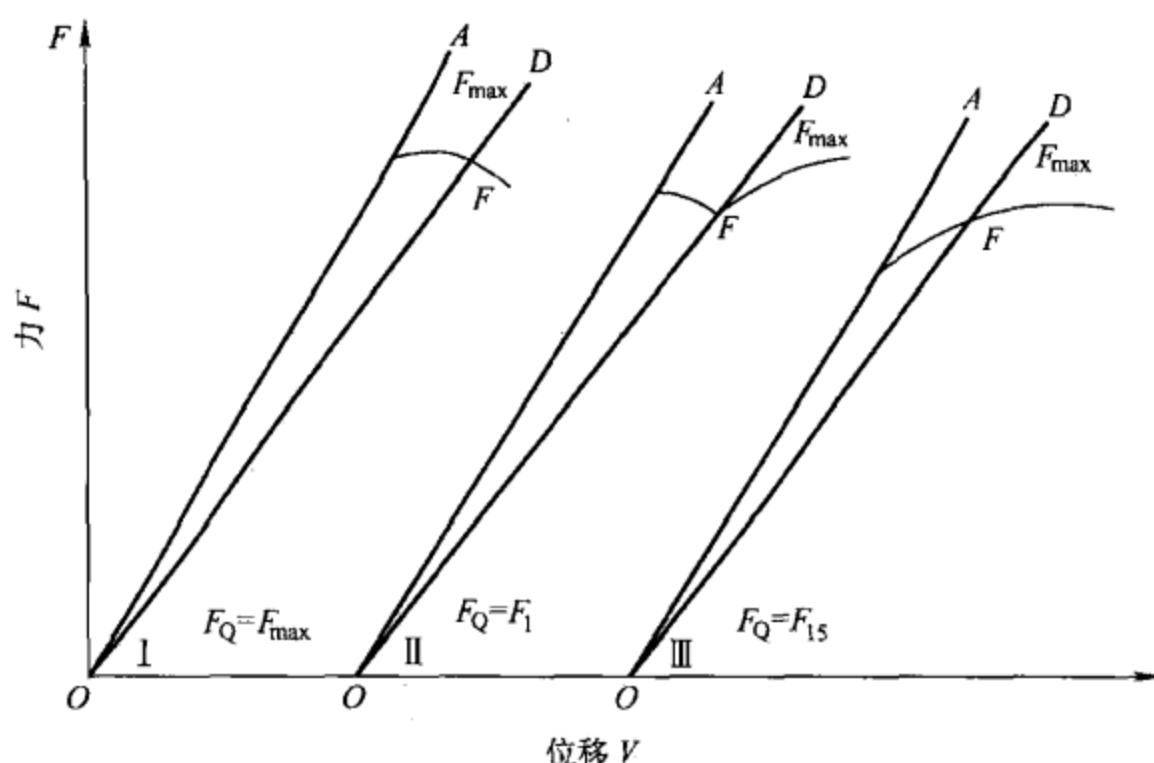


图 9-25 三种典型的  $F$ - $V$  曲线

### 3. 条件断裂韧度 $K_{IQ}$ 的计算

条件断裂韧度  $K_{IQ}$  按下式计算:

$$K_{IQ} = (M/\Phi) \sigma \sqrt{\pi a}$$

式中  $K_{IQ}$ ——表面裂纹拉伸试样的条件断裂韧度, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ ;

$a$ ——裂纹深度, 单位为  $\text{mm}$ ;

$M/\Phi$ ——系数比值, 如表 9-3 所示;

$\sigma$ —— $\sigma = F_Q/(BW)$ , 式中  $F_Q$  是条件力, 单位为  $\text{N}$ ,  $B$  是试样厚度, 单位为  $\text{mm}$ ;  $W$  是试样宽度, 单位为  $\text{mm}$ 。

### 4. $K_{IC}(B)$ 的确定

1) 当下面三个式子同时成立时,  $K_{IC}(B) = K_{IQ}$ 。

$$F_{\max}/F_Q \leq 1.2$$

$$a \geq 0.50 (K_{IQ}/R_{p0.2})^2$$

$$(B - a) \geq 0.50 (K_{IQ}/R_{p0.2})^2$$

### 5. $K_{IC}$ 的确定

用不同厚度的板材测定  $K_{IC}(B)$ , 然后绘制  $K_{IC}(B)$ - $B$  曲线。当所得的  $K_{IC}(B)$  不随板材厚度变化时,  $K_{IC}(B)$  值即为材料的  $K_{IC}$  值。

表 9-3  $M/\Phi$  值

$a/B$ $a/C$	0.400	0.410	0.420	0.430	0.440	0.450	0.460	0.470	0.480	0.490	0.500
0.400	1.0724	1.0780	1.0836	1.0894	1.0952	1.1012	1.1071	1.1132	1.1193	1.1255	1.1317
0.410	1.0650	1.0684	1.0739	1.0795	1.0852	1.0909	1.0967	1.1025	1.1084	1.1144	1.1204
0.420	1.0538	1.0591	1.0644	1.0648	1.0753	1.0806	1.0864	1.0921	1.0978	1.1036	1.1094
0.430	1.0447	1.0498	1.0550	1.0602	1.0655	1.0709	1.0763	1.0818	1.0873	1.0929	1.0985
0.440	1.0358	1.0407	1.0457	1.0508	1.0559	1.0611	1.0564	1.0717	1.0770	1.0825	1.0879
0.450	1.0270	1.0318	1.0366	1.0415	1.0465	1.0515	1.0566	1.0618	1.0669	1.0772	1.0775
0.460	1.0183	1.0229	1.0276	1.0324	1.0372	1.0421	1.0470	1.0520	1.0570	1.0621	1.0672
0.470	1.0098	1.0142	1.0188	1.0234	1.0281	1.0328	1.0376	1.0424	1.0473	1.0522	1.0571
0.480	1.0013	1.0057	1.0101	1.0145	1.0191	1.0236	1.0283	1.0329	1.0377	1.0424	1.0472
0.490	0.9930	0.9972	1.0015	1.0058	1.0102	1.0146	1.0191	1.0236	1.0282	1.0328	1.0375
0.500	0.9848	0.9889	0.9930	0.9972	1.0015	1.0058	1.0101	1.0145	1.0189	1.0234	1.0279
0.510	0.9767	0.9807	0.9847	0.9887	0.9929	0.9970	1.0012	1.0055	1.0098	1.0141	1.0185
0.520	0.9687	0.9725	0.9764	0.9804	0.9844	0.9884	0.9925	0.9966	1.0008	1.0050	1.0092
0.530	0.9608	0.9645	0.9683	0.9721	0.9760	0.9799	0.9839	0.9879	0.9919	0.9960	1.0001
0.540	0.9530	0.9567	0.9603	0.9640	0.9678	0.9716	0.9754	0.9793	0.9832	0.9871	0.9911
0.550	0.9454	0.9489	0.9524	0.9560	0.9597	0.9633	0.9671	0.9708	0.9746	0.9784	0.9823
0.560	0.9378	0.9412	0.9446	0.9481	0.9517	0.9552	0.9588	0.9625	0.9662	0.9699	0.9736
0.570	0.9303	0.9336	0.9370	0.9403	0.9438	0.9472	0.9507	0.9543	0.9578	0.9614	0.9650
0.580	0.9229	0.9261	0.9294	0.9387	0.9360	0.9393	0.9427	0.9462	0.9496	0.9531	0.9566
0.590	0.9157	0.9188	0.9219	0.9251	0.9283	0.9316	0.9349	0.9382	0.9415	0.9449	0.9483
0.600	0.9085	0.9115	0.9145	0.9176	0.9207	0.9239	0.9271	0.9303	0.9336	0.9368	0.9401
$a/B$ $a/C$	0.5000	0.5100	0.5200	0.5300	0.5400	0.5500	0.5600	0.5700	0.5800	0.5900	0.6000
0.400	1.1317	1.1379	1.1442	1.1506	1.1569	1.1633	1.1697	1.1762	1.1826	1.1891	1.1955
0.410	1.1204	1.1265	1.1329	1.1387	1.1448	1.1510	1.1572	1.1634	1.1697	1.1759	1.1821
0.420	1.1094	1.1152	1.1211	1.1271	1.1330	1.1390	1.1450	1.1510	1.1570	1.1630	1.1691
0.430	1.0985	1.1042	1.1099	1.1156	1.1214	1.1272	1.1330	1.1388	1.1446	1.1505	1.1563
0.440	1.0879	1.0934	1.0989	1.1045	1.1100	1.1156	1.1212	1.1269	1.1325	1.1381	1.1438
0.450	1.0775	1.0828	1.0881	1.0935	1.0989	1.1043	1.1097	1.1152	1.1206	1.1261	1.1315
0.460	1.0672	1.0723	1.0775	1.0827	1.0879	1.0932	1.0984	1.1037	1.1090	1.1142	1.1195
0.470	1.0571	1.0621	1.0671	1.0721	1.0772	1.0823	1.0874	1.0925	1.0976	1.1027	1.1077
0.480	1.0472	1.0520	1.0569	1.0618	1.0667	1.0716	1.0765	1.0814	1.0864	1.0913	1.0962
0.490	1.0375	1.0421	1.0468	1.0516	1.0563	1.0611	1.0658	1.0706	1.0754	1.0802	1.0849
0.500	1.0279	1.0324	1.0370	1.0415	1.0461	1.0507	1.0554	1.0600	1.0646	1.0692	1.0739
0.510	1.0185	1.0229	1.0273	1.0317	1.0362	1.0406	1.0451	1.0496	1.0540	1.0585	1.0630
0.520	1.0092	1.0135	1.0177	1.0220	1.0263	1.0307	1.0350	1.0393	1.0437	1.0480	1.0523
0.530	1.0001	1.0042	1.0084	1.0125	1.0167	1.0209	1.0257	1.0293	1.0335	1.0377	1.0419
0.540	0.9911	0.9951	0.9991	1.0032	1.0072	1.0113	1.0153	1.0194	1.0235	1.0275	1.0316
0.550	0.9823	0.9862	0.9901	0.9940	0.9976	1.0018	1.0058	1.0097	1.0136	1.0176	1.0215
0.560	0.9736	0.9773	0.9811	0.9849	0.9887	0.9925	0.9963	1.0002	1.0040	1.0078	1.0116
0.570	0.9650	0.9687	0.9723	0.9760	0.9797	0.9834	0.9871	0.9908	0.9945	0.9982	1.0019
0.580	0.9566	0.9601	0.9637	0.9672	0.9708	0.9744	0.9780	0.9816	0.9852	0.9887	0.9923
0.590	0.9483	0.9517	0.9552	0.9586	0.9621	0.9656	0.9690	0.9725	0.9760	0.9795	0.9829
0.600	0.9401	0.9435	0.9468	0.9501	0.9535	0.9569	0.9602	0.9636	0.9670	0.9703	0.9737

## 6. 剩余强度 $\sigma_r$ 的确定

剩余强度  $\sigma_r$  按下式计算:

$$\sigma_r = F_{\max} / (BW)$$

式中  $\sigma_r$ ——剩余强度, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$F_{\max}$ ——最大拉伸力, 单位为  $\text{N}$ ;

$B$ ——试样厚度, 单位为  $\text{mm}$ ;

$W$ ——试样宽度, 单位为  $\text{mm}$ 。



# 第 10 章 金属材料高温长时性能

## 10.1 高温长时性能相关知识

在高温下，金属与合金的力学性能虽然在很多方面与常温下的力学性能有共同的现象和规律，但也有许多与常温下不同的特点。高温下金属及合金中出现的扩散、回复、再结晶等现象，会使其组织发生变化。金属材料长时间暴露在高温下，也会使其性能受到破坏。

在高压蒸汽锅炉、汽轮机、燃气轮机、柴油机、化工炼油设备及航空发动机中，很多部件都是在高温条件下长期服役的。对于制造这些高温设备部件的金属材料，若仅按常温力学性能进行设计，显然是不合理的。这是因为温度和载荷持续时间对金属材料的力学性能影响极大。表 10-1 为 GH3128 高温合金的高温短时力学性能，表 10-2 为 GH3128 高温合金的持久强度。可以看出，在 800℃ 时，屈服强度为 226N/mm<sup>2</sup>，但当承受 113N/mm<sup>2</sup> 的载荷时，持续时间仅有 352h，并且在相同温度下应力越低持续时间越长，随着温度的升高能承受的载荷应力逐渐降低。

表 10-1 GH3128 高温合金的高温短时力学性

试验温度/℃	800	900	950	1000	1100
抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	382 ~ 402	225 ~ 254	176 ~ 215	108 ~ 118	83 ~ 89
规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	226	166			
断后伸长率 $A(\%)$	70 ~ 89	52 ~ 98	86 ~ 100	72 ~ 83	47

表 10-2 GH3128 高温合金的持久强度

试验温度/℃	800			850		900		1000	
持久强度 $\sigma_r/(N/mm^2)$	69	90	113	44	59	58	49	59	20
持续时间/h	5018	1134	352	535.3	1096	1190	336	165	340

蒸汽锅炉及化工设备中的一些高温管道，虽然其承受的应力远远小于工作温度下的屈服强度，但是在长期使用过程中，会产生缓慢而连续的塑性变形，使管径日益增大能承受的应力值降低。若设计时所选用的应力偏高，就可能导致管道使用一段时间后发生破裂。

另外, 温度和持续时间也能影响金属材料的断裂形式。温度升高时晶粒强度和晶界强度都要降低, 但由于晶界上原子排列不规则, 扩散容易通过晶界进行, 因此晶界强度随温度上升下降较快。在常温时由于晶界强度较高, 所以其断裂都是穿晶韧性断裂。随着温度的上升, 出现晶粒和晶界强度相等, 此时的温度称为等强温度  $t_E$ , 如图 10-1 所示。当试验是在  $t_E$  温度以下时, 金属断裂时的断口都是穿晶断口。当试验温度高于  $t_E$  时, 金属的断裂便由常见的穿晶断裂过渡到晶间断裂。金属材料的等强温度并不是固定不变的, 变形速率对等强温度有很大的影响。随着变形速率的提高, 等强温度也提高, 如图 10-2 所示。这是因为晶界强度对变形速率的敏感性比晶粒大得多。

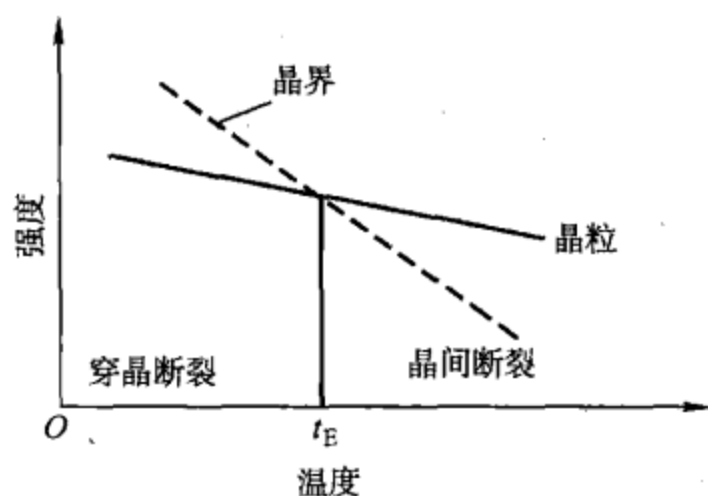


图 10-1 等强温度示意图

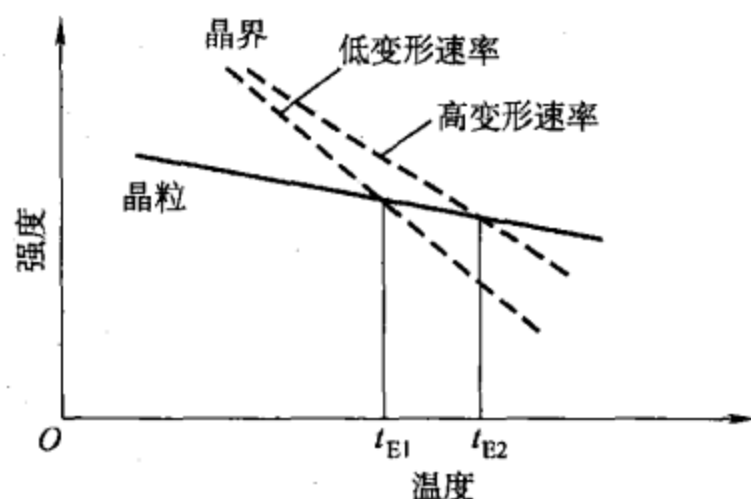


图 10-2 变形速率对等强温度的影响

高温长时力学性能试验是材料在高温下长时间保持恒定载荷或恒定变形的力学性能试验, 工程上常用的有蠕变试验、持久强度试验和应力松弛试验。材料的高温长时力学性能对航空、化工、锅炉、电站等高温构件具有十分重要的意义。

## 10.2 金属拉伸蠕变及持久试验

### 10.2.1 拉伸蠕变及持久试验简介及相关术语

#### 1. 蠕变试验

(1) 蠕变的定义 材料在高温下一个重要的特点就是产生蠕变。所谓蠕变就是金属在恒定温度和恒定载荷 (或恒定应力) 作用下, 随时间延长产生缓慢塑性变形的现象, 温度越高, 应力越大, 蠕变速度越快。蠕变试验是在规定温度及恒定载荷下测定试样蠕变变形随时间变化的试验。在变动载荷下的蠕变试验称为动蠕变试验。蠕变温度是金属在高于某一温度时才发生显著蠕变的温度。蠕变应力是材料发生蠕变时承受的应力, 称为蠕变强度。在特定条件下, 蠕变强度即为蠕变极限。蠕变变形是材料在蠕变过程中产生的塑性变形, 工程上以伸长率 (%) 表示。典



型高温构件常以规定的蠕变变形作为构件的蠕变设计准则。

(2) 蠕变过程 蠕变过程可以用蠕变曲线,即蠕变变形与试验时间关系曲线来描述。金属的典型蠕变曲线可分为三个阶段。

- 1) 蠕变第一阶段中,蠕变速率随时间而降低,称为蠕变减速阶段。
- 2) 蠕变第二阶段的蠕变速率保持恒定,称恒速蠕变阶段或稳态蠕变阶段。
- 3) 蠕变第三阶段的蠕变速率显著增大,称为蠕变加速阶段。

通过蠕变曲线可观察材料蠕变变形全过程,并测出蠕变初始变形和总变形,以及第二阶段蠕变速率。材料蠕变第二阶段的蠕变速率是锅炉、电站等高温长时工作构件设计选材的重要依据之一。

(3) 蠕变回复 蠕变回复是蠕变试验过程中或试验结束后,卸除试样上的载荷,变形随时间的延长逐渐减小的现象,与材料类型、受力状态以及温度范围有关。蠕变回复是评定材料高温性能的一个方面,为了设计和选材,有时需求出材料蠕变回复的大小、回复速率及其与时间的相互关系。

## 2. 持久强度试验

某些高温下工作的机件,蠕变变形很小或对变形要求不严格,只要求在使用期间内不发生断裂。在这种情况下,要用持久强度作为高温构件设计的主要依据。持久强度是材料在一定温度下和规定的时间内不致断裂的最大应力。持久强度试验是在规定温度及恒定载荷作用下,测定试样至断裂的持续时间的试验。通过试验可求得材料的持久强度及持久塑性。持久塑性是试样在恒定温度及恒定载荷长时作用下产生的塑性变形,是评定材料高温性能的重要判据之一。持久塑性过低,会使材料在使用过程中产生脆性断裂。

持久强度曲线是持久应力与断裂时间的关系曲线,工程上一般在双对数坐标上绘制此曲线。试验时在各种温度 $t$ 和应力 $\sigma$ 下,测出各个试样的断裂时间 $\tau$ ,绘出各种温度下的 $\sigma$ - $\tau$ 曲线;再根据曲线外推或内插出各种温度下达到规定断裂时间的应力,即为材料的持久强度。

## 3. 相关术语

(1) 蠕变极限 在规定温度下,使试样在规定时间产生的蠕变伸长率(总伸长率或塑性伸长率)或稳态蠕变速率不超过规定值的最大应力。

(2) 持久强度极限 试样在规定温度下达到规定的试验时间而不产生断裂的最大应力。

(3) 持久断后伸长率 持久试样断裂后,在室温下计算长度部分的增量与原始计算长度的百分比,用 $\delta$ 表示, $\delta = [(L_u - L_0)/L_0] \times 100\%$ 。式中, $L_u$ 为试样断后标记长度(mm); $L_0$ 为试样原始计算长度(mm)。当标记标在计算长度之外时,则为原始标记长度的增量与原始计算长度的百分比,用公式 $\delta = [(L_u - L_c)/L_0] \times 100\%$ 计算。式中, $L_c$ 为试样原始标距长度(mm)。对圆形横截面试样, $L_c$ 与 $L_0$ 之



2) 标准持久试样直径为 5mm 和 10mm，原始计算长度分别为 25mm 和 50mm，如图 10-4 和图 10-5 所示。为了准确地计算持久断后伸长率，可适当减小过渡圆弧半径。

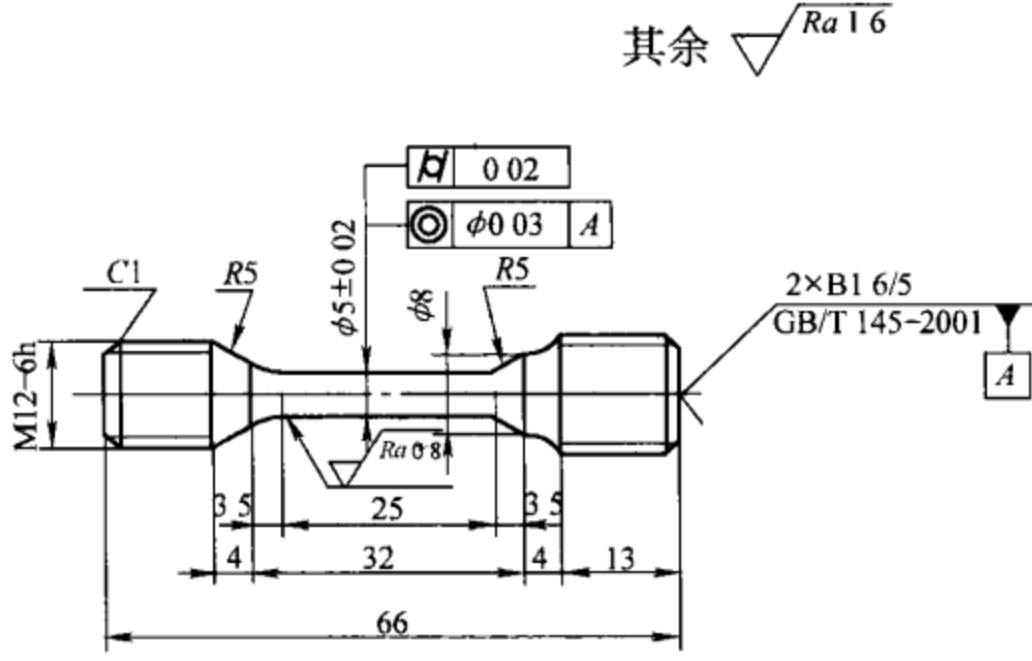


图 10-4 直径 5mm 的圆形横截面标准持久试样

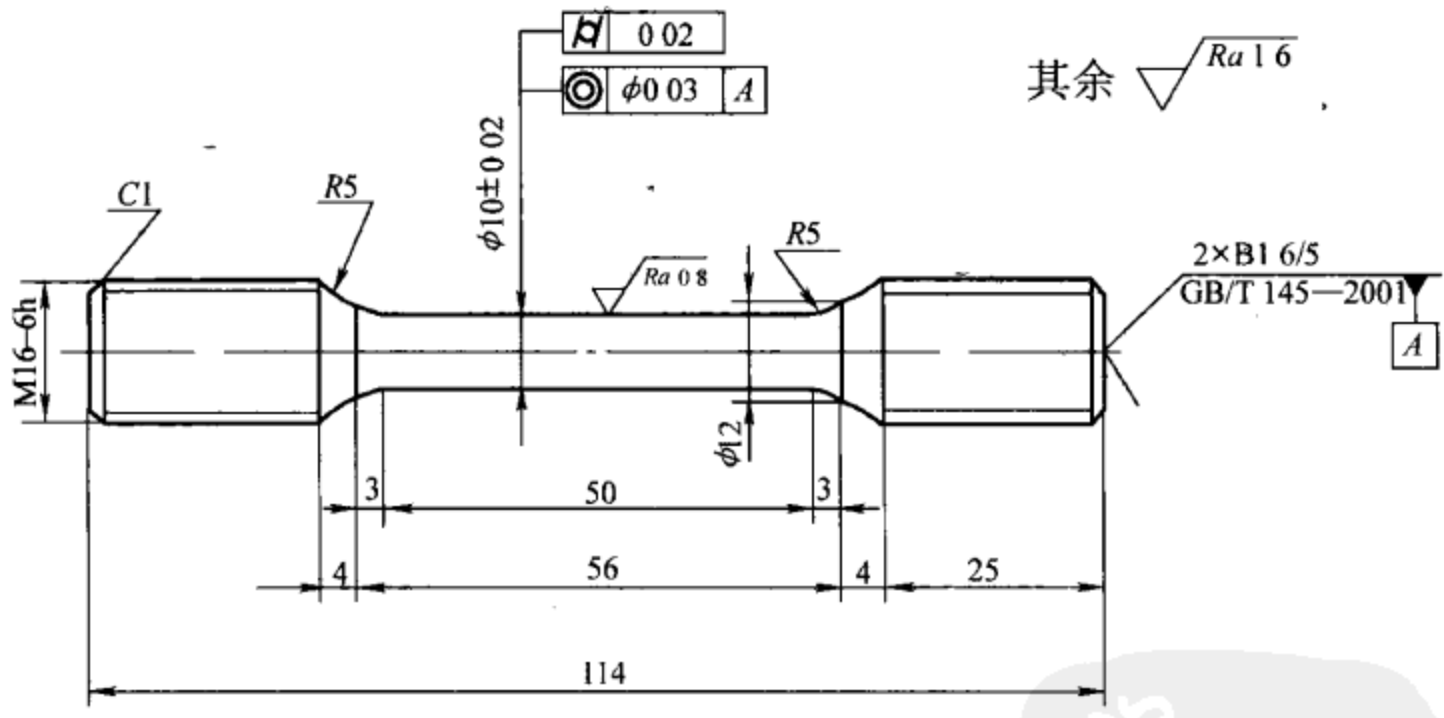


图 10-5 直径 10mm 的圆形横截面标准持久试样

3) 缺口持久试样的弹性应力集中系数  $K_t = 3.85$ ，试样尺寸如图 10-6 所示。

3. 矩形横截面试样

1) 蠕变试样厚度一般为 1 ~ 5mm，宽度为 6 ~ 15mm，原始计算长度为 50 ~ 100mm，如图 10-7 所示。

2) 矩形横截面持久试样宽度一般为 10mm，如图 10-8 所示。原始计算长度与厚度的关系如表 10-3 所示。

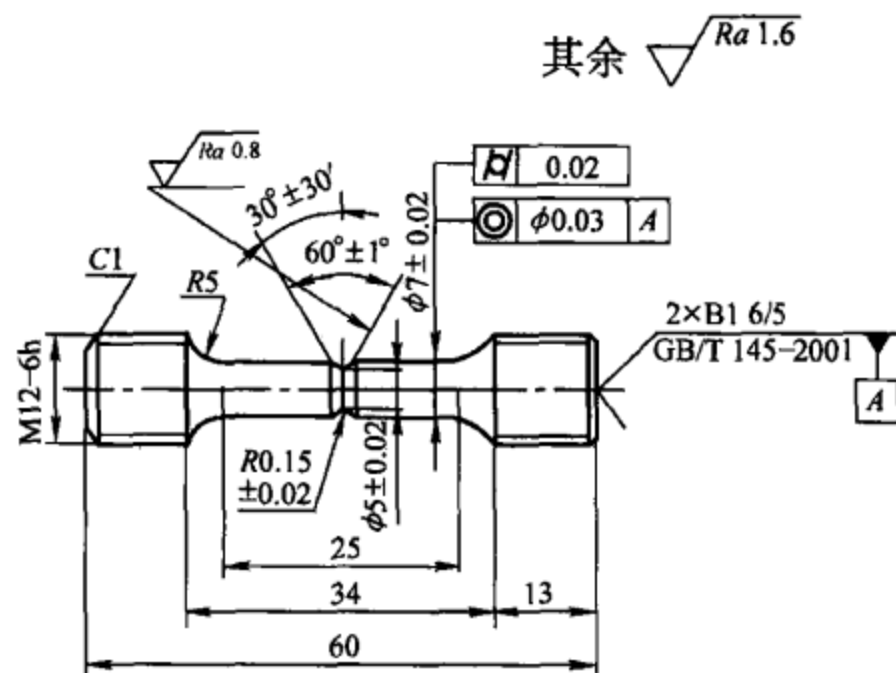


图 10-6 圆形横截面缺口持久试样

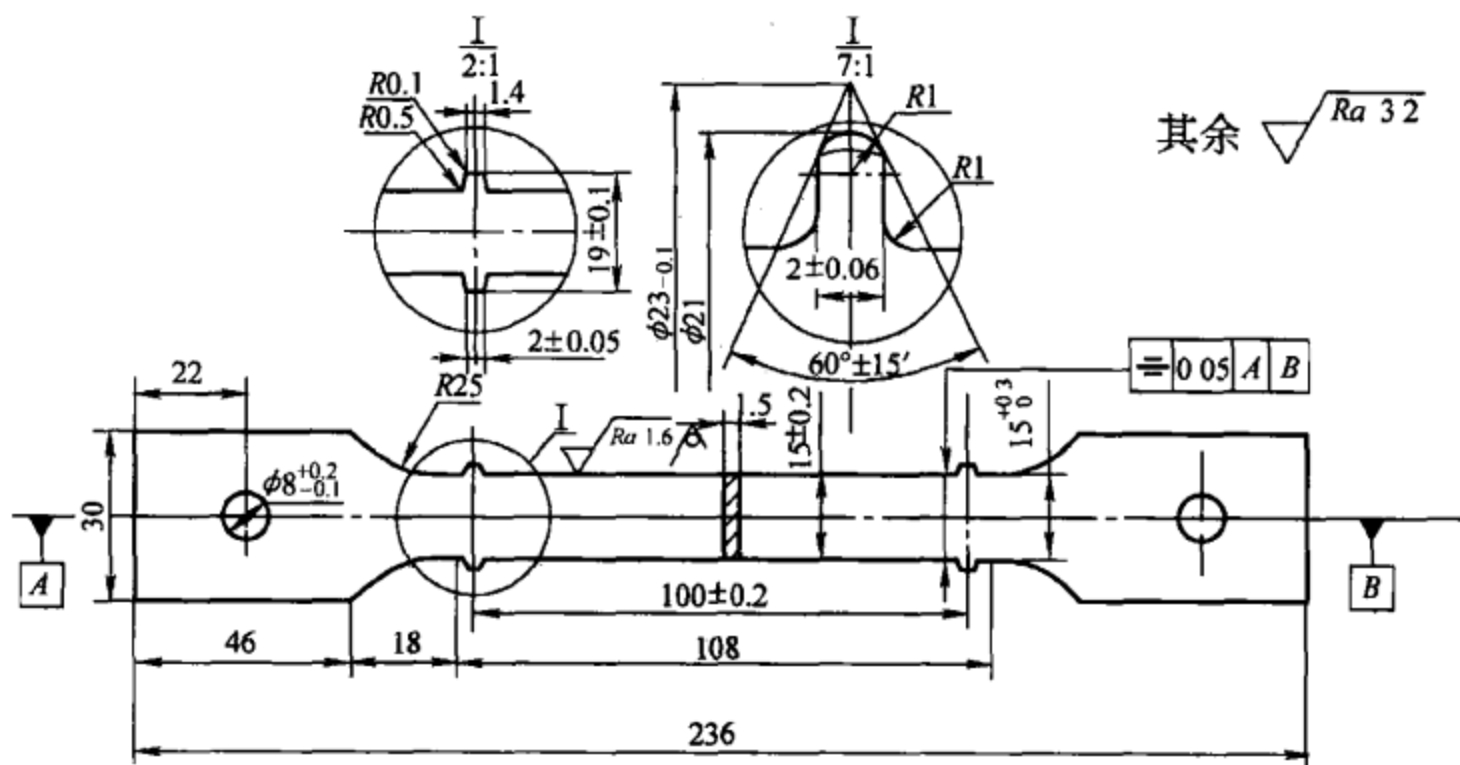


图 10-7 矩形横截面标准蠕变试样

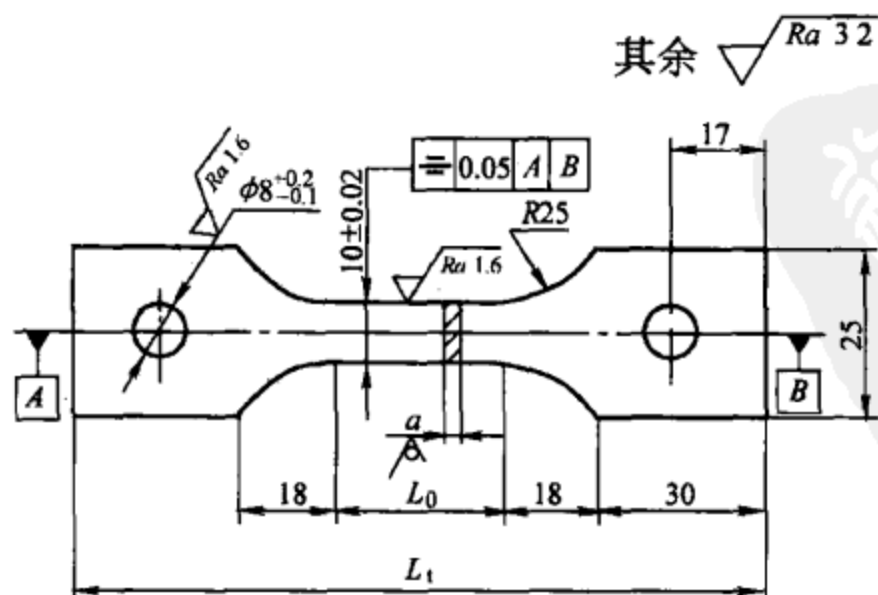


图 10-8 矩形横截面标准持久试样

$a$ —矩形横截面试样厚度 (mm)  $L_0$ —试样原始计算长度 (mm)  $L_1$ —试样总长度 (mm)

表 10-3 原始计算长度与厚度的关系 (单位: mm)

$a$	$\geq 0.8 \sim 1.0$	$> 1.0 \sim 1.5$	$> 1.5 \sim 2.4$	$> 2.4 \sim 3.0$
$L_0$	15	20	25	30
$L_1$	111	116	121	126

### 10.2.3 拉伸蠕变及持久试验设备

蠕变试验是测定材料温度、应力、变形和时间四者之间关系的试验。试验时将试样加热至规定温度,沿试样纵轴方向施加恒定的试验力或恒定应力使试样受到拉伸,测定达到规定蠕变量的稳态蠕变速率。所谓恒定应力是指在整个试验过程中任一瞬间力与试样横截面的比率应为恒定值。试样的加热温度应始终保持不超过规定允许偏差的恒定状态。蠕变伸长的测量也有精确的要求。蠕变试验的持续时间较长,一般试样需试验数千小时甚至更长时间,长时试验稳定、可靠便是对蠕变试验设备基本要求。

1) 试验机在使用范围内(5%~100%)力值相对误差应不大于 $\pm 1.0\%$ ,示值相对变动度应不大于1.0%,试验机上下夹头拉杆之间的试验力同轴度应不超过15%。

2) 蠕变变形测量仪器的最小分度值应不大于 $1\mu\text{m}$ ,误差一般应不大于总蠕变伸长的 $\pm 1\%$ 。

3) 测温热电偶应符合 JJG 141—2000《工作用贵金属热电偶检定规程》、JJG 351—1996《工业用廉金属热电偶检定规程》或 JJG 368—2000《工作用铜-铜镍热电偶检定规程》中 II 级热电偶要求。热电偶的允许误差如表 10-4 所示。

表 10-4 热电偶的允许误差

热电偶	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	允许误差/ $^{\circ}\text{C}$
铂铑 10-铂(S)	0~600	$\pm 1.5$
	$> 600 \sim 1600$	$\pm 0.25\%t$
镍铬-镍硅(K)	$\leq 400$	$\pm 3$
	$> 400$	$\pm 0.75\%t$
镍铬-考铜(E)	$\leq 300$	$\pm 4$
	$> 300$	$\pm 1\%t$

注:  $t$  为所测试温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

4) 温度补偿系统应使热电偶冷端温度保持恒定,允许偏差在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 之内。

5) 温度测量仪器的分辨率应在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 之内,误差应不大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

6) 温度控制及加热装置应保证在试验期间温度符合表 10-5 的要求。

表 10-5 试验温度的偏差和梯度

(单位:℃)

试验温度	温度偏差	温度梯度
<900	±3	3
900 ~ 1100	±4	4

注: 1. 温度梯度: 试验中任一瞬间试样所有被测点温度的最高值与最低值之差。

2. 试验温度应包括对热电偶及测量仪器误差的修正。

3. 对于温度超过 1100℃ 的试验, 温度偏差及温度梯度应由有关双方协商确定。

7) 加热炉均温区一般应不小于试样计算长度的 1.5 倍。

### 10.2.4 试验要求

1) 试验室温度一般应保持在 10 ~ 35℃ 之内, 试验室应远离或隔离振源, 室内严防振动。

2) 试验前, 应对试样表面及尺寸进行检查, 试样表面不应有划伤或缺陷。试样的横截面尺寸应在计算长度内的两端及中部测量, 在每处相互垂直方向上各测一次, 以计算的最小横截面积为准。测量试样截面尺寸的量具最小分度值应不大于 0.01mm。

3) 计算长度不大于 50mm 的试样, 一般应在两端各固定一支热电偶; 计算长度大于 50mm 的试样, 应在两端及中部各固定一支热电偶。对于缺口试样, 应有一支热电偶固定于缺口处。热电偶工作端应紧贴试样表面, 并应防止炉壁热辐射。

4) 对于蠕变试验, 推荐使用双面变形测量装置, 引伸计的结构和装卡应能真实地反映试样轴线方向的伸长, 并应避免变形读数受室温变化和气流的影响。试验前, 用适当增量的力检查引伸计装卡质量, 必要时对引伸计进行调整, 使两侧变形读数的平均值与任一侧读数之差除以平均值的百分比不大于 15%。

5) 试样在加热炉内不应受到非轴向力的作用。

6) 升温前, 可对试样施加初始力, 此力应不大于总试验力的 10%, 且应力不超过  $10\text{N/mm}^2$ 。

7) 将试样加热至规定温度的时间一般为 2 ~ 8h, 温度保持时间在 1 ~ 24h。在升温及保温期间, 不应超过规定温度上限。对于升温及保温时间应做记录。

8) 达到保温时间后, 平稳地施加试验力。对于蠕变试验, 应将砝码分成适当级数, 记录施加每级力的变形值, 在力-伸长 ( $F-\Delta L$ ) 曲线上求得弹性变形及起始塑性变形值, 如图 10-9 所示。

9) 对试验温度要进行自动记录, 温度测量间隔应保证在整个试验期间温度符合表 10-5 的要求。

10) 蠕变变形的记录应保证明确地绘出蠕变曲线。



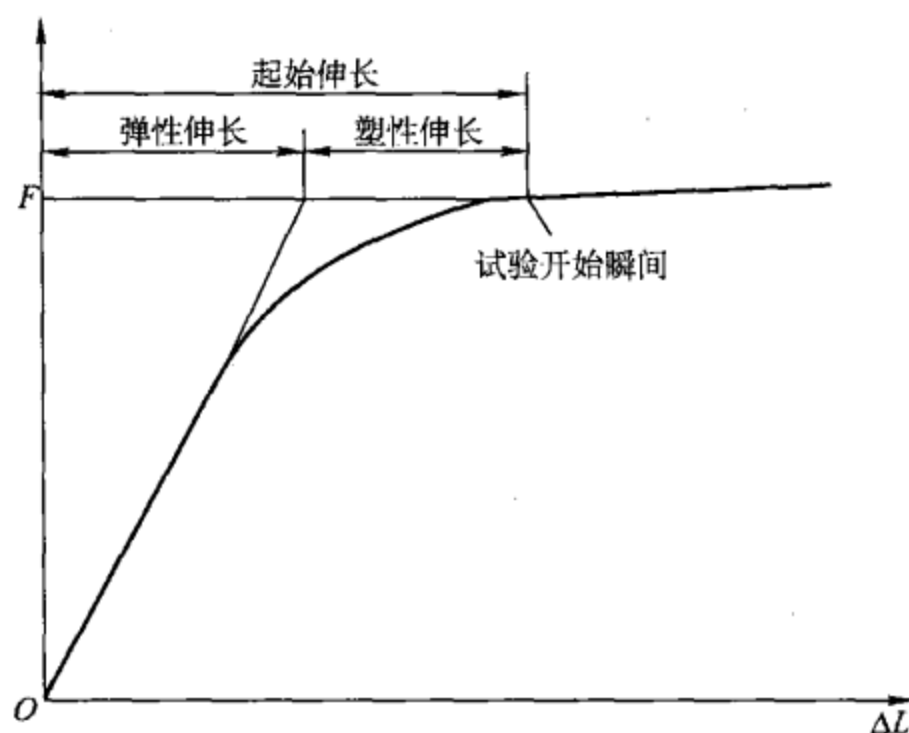


图 10-9 蠕变试验加力过程中的力-伸长曲线

11) 试验中因故中途停试时, 应在试样上保持试验力。但应避免由于低温收缩而导致试样上的力超过规定值。当重新试验时, 达到规定温度并保温后开始记录。

12) 试验累积时间用误差不大于  $\pm 0.2\%$  的计时器自动记录。

13) 达到规定时间时, 对于不能采用分级加力记录变形的蠕变试验, 卸除主试验力后要继续测量滞弹变形, 直至基本回复为止, 如图 10-10 所示。

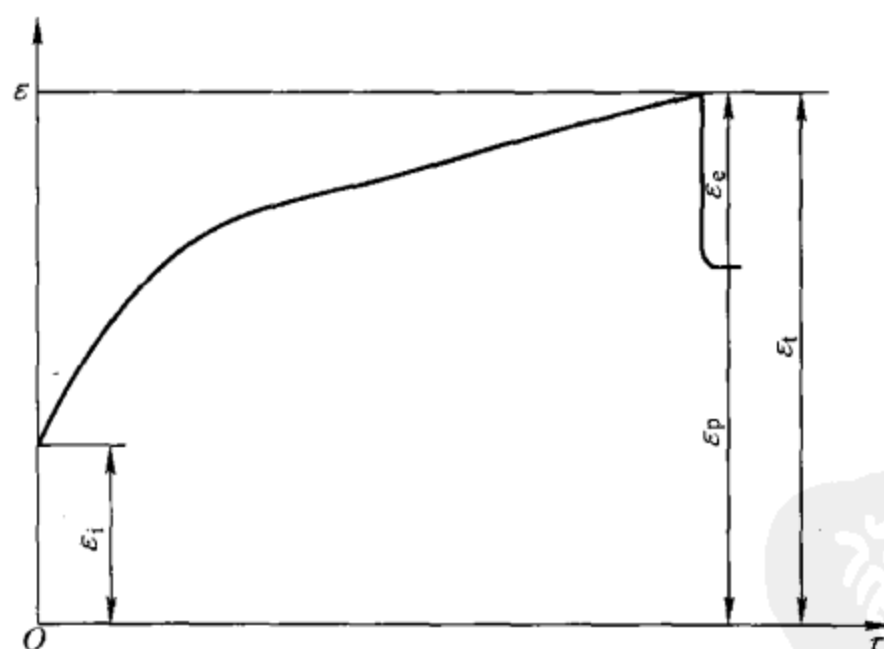


图 10-10 蠕变曲线

$\varepsilon_i$ —蠕变起始伸长率 (%)  $\varepsilon_e$ —蠕变弹性伸长率 (%)

$\varepsilon_p$ —蠕变塑性伸长率 (%)  $\varepsilon_t$ —蠕变总伸长率 (%)

### 10.2.5 蠕变极限的测定

#### 1. 蠕变速度的确定方法

蠕变速度是指单位时间内单位计算长度的变形量, 单位计算长度变形也称相对



变形或应变。时间单位为 h，蠕变速度单位为 %/h。如图 10-11 所示，在蠕变曲线上，从  $\tau_1$  至  $\tau_2$  时间内，试样变形增加量为  $\Delta l$ 。当用千分表或差动变压器测量时，读数单位为  $\mu\text{m}$ 。设试样计算长度为 100mm，蠕变速度为

$$V = \frac{\Delta l}{1000} \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \times 100\%$$

式中  $V$ ——蠕变速度，单位为 %/h；

$\Delta l$ —— $\tau_2 - \tau_1$  时间内的蠕变变形增量，单位为  $\mu\text{m}$ 。

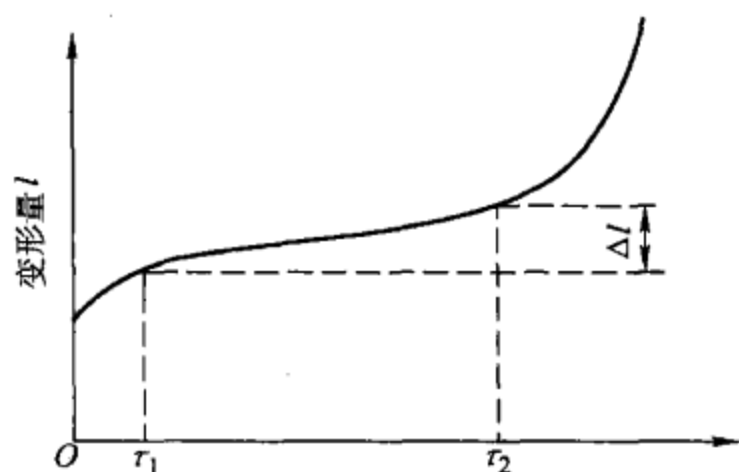


图 10-11 蠕变速度的确定方法

用于计算第二阶段蠕变速度时，选取的时间间隔应尽可能长一点，一般不小于 500h。由于试验过程中炉温、室温的影响，并不是每次试验绘制的蠕变曲线都很光滑，当有些波动时，应从整条蠕变曲线的趋势决定选取哪一段作为蠕变第二阶段。对于因停电而停止而后再恢复试验的蠕变曲线应予以修正。

## 2. 等温线法确定蠕变极限

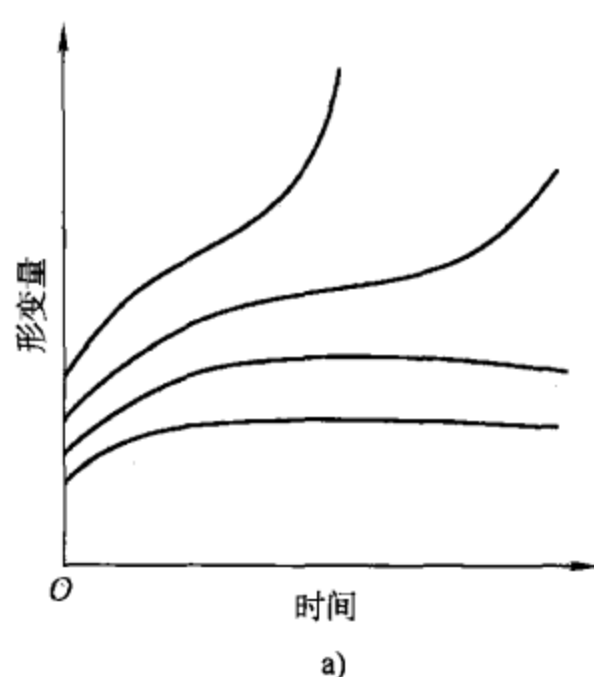
在恒定温度下，蠕变第二阶段的蠕变速度  $V$  与试验应力  $\sigma$  有如下关系：

$$V = K\sigma^n$$

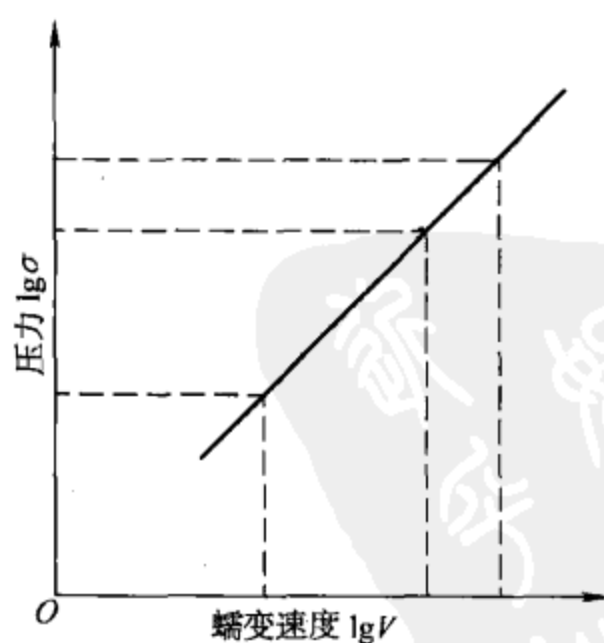
两边取对数可得到：

$$\lg V = \lg K + n \lg \sigma$$

显然在双对数坐标上，第二阶段蠕变速度与应力呈线性关系，如图 10-12 所示。由图可求出任意规定的蠕变速度下的蠕变极限。



a)



b)

图 10-12 蠕变极限测量方法

a) 形变-时间曲线 b) 双对数曲线

具体程序如下:

- 1) 在同一试验温度下 (一般选用材料的使用工作温度), 以不同的应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ... 分别进行蠕变试验, 并绘出蠕变曲线, 计算出各应力下对应的第二阶段蠕变速度  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ ...
- 2) 在双对数坐标图上, 以应力为纵坐标, 蠕变速度为横坐标绘图。
- 3) 将双对数坐标上的点连成直线。
- 4) 该直线上蠕变速度为  $10^{-5}\%/h$  所对应的应力, 即为规定蠕变速度  $10^{-5}\%/h$  的蠕变极限。
- 5) 用内插法或外推法可求出蠕变速度为其他数值时的蠕变极限。

### 10.2.6 持久强度极限的测定

在 5 个以上适当的应力水平进行等温持久试验, 至少有 3 个应力水平每组做出 3 个数据, 在单对数或双对数坐标上用作图法或最小二乘法绘制出应力-断裂时间曲线。用内插法或外推法求出温度  $t$ 、时间  $\tau$  下的持久强度极限  $\sigma'_t$ 。

持久强度极限测定实例: 材料为 0Cr15Ni5Cu2Ti, 求其在  $400^\circ\text{C}$  下工作 500h 的持久强度。

#### 1. 预计持久强度极限

0Cr15Ni5Cu2Ti 合金在室温下, 抗拉强度  $R_m$  为  $129 \sim 130\text{N/mm}^2$  之间。若将换算系数  $K$  估计为 0.6, 则按  $\sigma'_t = 0.6R_m$  的经验关系式预计持久强度极限应在  $80\text{N/mm}^2$  附近。

#### 2. 逐步靠近法作 $\sigma$ - $t$ 图

采用逐步靠近的方法, 在试验温度为  $400^\circ\text{C}$ , 先做两个  $80\text{N/mm}^2$  的试样。持久寿命通过了 500h, 可初步断定持久强度极限  $\sigma'_t$  很可能在  $80\text{N/mm}^2$  以上附近。分别在  $81\text{N/mm}^2$ 、 $82\text{N/mm}^2$ 、 $83\text{N/mm}^2$ 、 $84\text{N/mm}^2$ 、 $85\text{N/mm}^2$  5 个应力水平上各做两个试样, 试验数据如表 10-6 所示。

表 10-6 采用逐步靠近法得到的持久强度试验数据

$\sigma/(\text{N/mm}^2)$	时间/h		平均值/h	$\sigma/(\text{N/mm}^2)$	时间/h		平均值/h
80	548.0	520.0	534.0	83	362.5	392.4	377.5
81	427.0	486.0	456.5	84	339.4	351.0	345.2
82	429.0	474.3	451.7	85	369.0	320.0	344.5

#### 3. 试验数据处理

- 1) 把表 10-6 中所列实测数据取自然对数, 如表 10-7 所示。

表 10-7 对表 10-6 数据取对数

$\sigma$	$\ln\sigma$	$\tau$	$\ln\tau$	$\sigma$	$\ln\sigma$	$\tau$	$\ln\tau$
81	4.394449	456.5	6.1233610	84	4.430816	345.2	5.844120
82	4.406719	451.7	6.112940	85	4.442651	344.5	5.842090
83	4.418840	377.5	5.933424				

2) 设表 10-7 数据满足双曲线方程:

$$\ln\sigma = C + a\ln\tau$$

设  $X = \ln\tau$ ,  $Y = \ln\sigma$ , 经计算:

$$L_{xy} = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = 0.010031368$$

$$L_{xx} = \sum (X_i - \bar{X})^2 = 0.001452995$$

$$L_{yy} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 = 0.077564773$$

得出

$$r = |L_{xy} / (L_{xx} L_{yy})^{1/2}| = 0.944921737$$

可以看出,  $\ln\tau$  和  $\ln\sigma$  之间有着密切的线性相关关系。

根据表 10-7, 计算特征值:

$$\bar{X}^2 = 35.65566892 \quad n\bar{X}^2 = 178.2783446$$

$$\bar{X}\bar{Y} = 26.38504434 \quad n\bar{X}\bar{Y} = 131.92552217$$

$$\sum_{i=1}^5 X_i^2 = 178.32559034 \quad \sum_{i=1}^5 X_i Y_i = 131.9153394$$

则回归方程  $\ln\sigma = C + a\ln\tau$  的系数:

$$a = \left( \sum_{i=1}^5 X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y} \right) / \left( \sum_{i=1}^5 X_i^2 - n\bar{X}^2 \right) = -0.127417533$$

$$C = \bar{Y} - a\bar{X} = 5.179535381$$

根据表 10-7 计算得:  $\bar{X} = 5.7912368$   $\bar{Y} = 4.418695$

将  $a$  和  $c$  代入式  $\ln\sigma = C + a\ln\tau$ , 得出具体方程:

$$\ln\sigma = 5.179535381 - 0.127417533\ln\tau$$

或者

$$\sigma = 177.61796860 / \tau^{0.127417}$$

3) 将  $\tau = 500\text{h}$  代入上面所得方程, 外推持久强度极限, 查反对数表, 得  $\sigma_r^t = 80.45398\text{N/mm}^2$ 。

## 10.3 金属应力松弛试验

### 10.3.1 应力松弛试验简介及相关术语

#### 1. 简介

应力松弛是在规定温度和规定约束条件下, 金属材料的应力随时间而减少的现

象。应力松弛试验是规定温度下,受拉或受压的试样构件在总变形保持不变而随时间延续应力自行降低的试验,包括拉伸应力松弛试验和弯曲松弛试验。

(1) 拉伸应力松弛试验 用圆柱形试样施加轴向载荷,保持其总变形不变,测定试样内剩余应力随时间的降低值。

(2) 弯曲松弛试验 采用半开口的环形试样,其工作部分设计成等强度。试验时,在开口处打入楔子,使工作部分保持恒定的弯曲变形,在试验过程中不同时刻测定试样的弹性张开位移 $\Delta$ ,代入剩余应力计算公式 $\sigma = AE\Delta$ ,算出剩余应力。式中, $A$ 为环形试样尺寸常数,标准试样的 $A$ 值为0.000583; $E$ 为弹性模量。典型的应力松弛过程可表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{总}} &= \varepsilon_{\text{弹}} + \varepsilon_{\text{塑}} = \text{常数} \\ \sigma &= E\varepsilon_{\text{弹}}\end{aligned}$$

式中  $\varepsilon_{\text{总}}$ ——总变形;

$\varepsilon_{\text{弹}}$ ——弹性变形;

$\varepsilon_{\text{塑}}$ ——塑性变形;

$\sigma$ ——试样承受的应力,单位为 $\text{N/mm}^2$ ;

$E$ ——弹性模量,单位为 $\text{N/mm}^2$ 。

应力松弛曲线是在给定温度和总变形量不变的条件下,表征应力和时间的关系曲线。松弛曲线可分为两个阶段。第一阶段应力降低较快,第二阶段应力降低缓慢,应力松弛速率保持恒定。应力松弛曲线的斜率,即单位时间内剩余应力的减小量称为松弛速率,也表示材料抗松弛的能力,即松弛稳定性。

## 2. 相关术语

(1) 约束条件 试验期间保持试样总应变(总变形或总位移)量恒定不变。

(2) 初始应力( $\sigma_0$ ) 应力松弛试验开始时对试样施加的应力。

(3) 初始试验力( $F_0$ ) 应力松弛试验开始时对试样施加的力。

(4) 零时间( $\tau_0$ ) 施加全部试验力或达到规定约束条件试验开始的时间,如图10-13所示。

(5) 初始试验力保持时间( $\tau_h$ ) 试验开始前保持初始试验力恒定的时间,如图10-13b所示。

(6) 剩余应力( $\sigma_r$ ) 应力松弛试验中任一时间试样上所保持的应力。

(7) 剩余试验力( $F_r$ ) 应力松弛试验中任一时间试样上所保持的力。

(8) 松弛应力( $\sigma_{re}$ ) 应力松弛试验中任一时间试样上所减少的应力,即初始应力与剩余应力之差。

(9) 松弛力( $F_{re}$ ) 应力松弛试验中任一时间试样上所减少的力,即初始试验力与剩余试验力之差。

(10) 松弛率( $R$ ) 松弛应力(或松弛力)与初始应力(或初始试验力)之

比的百分率。

(11) 应力松弛曲线 剩余应力或松弛应力与试验时间的关系曲线, 如图 10-14 所示。

(12) 应力松弛速率 ( $v_r$ ) 应力松弛曲线在任一时间上其斜率的绝对值, 如图 10-14 所示。

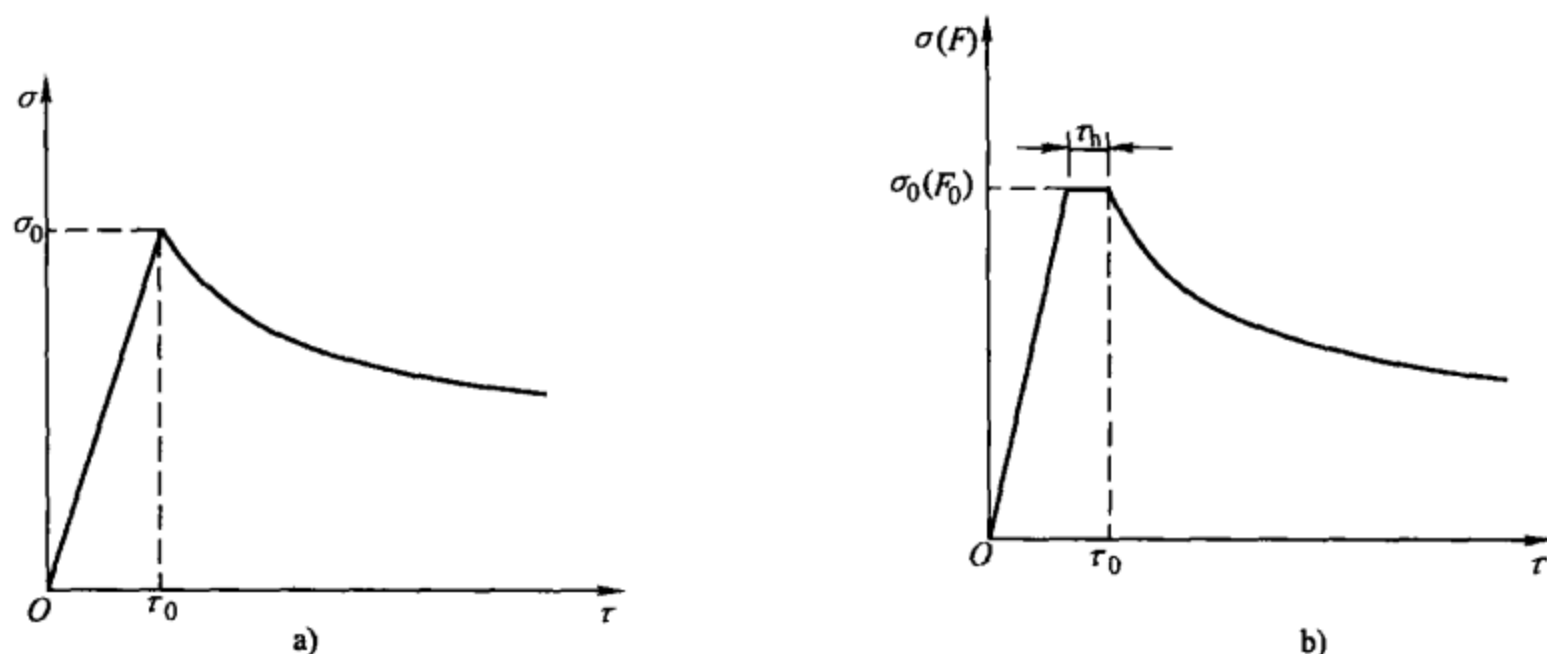


图 10-13 应力松弛试验的零时间和初始试验力保持时间

a) 施加全部试验力或达到规定约束条件试验开始的时间

b) 试验开始前保持初始试验力恒定的时间

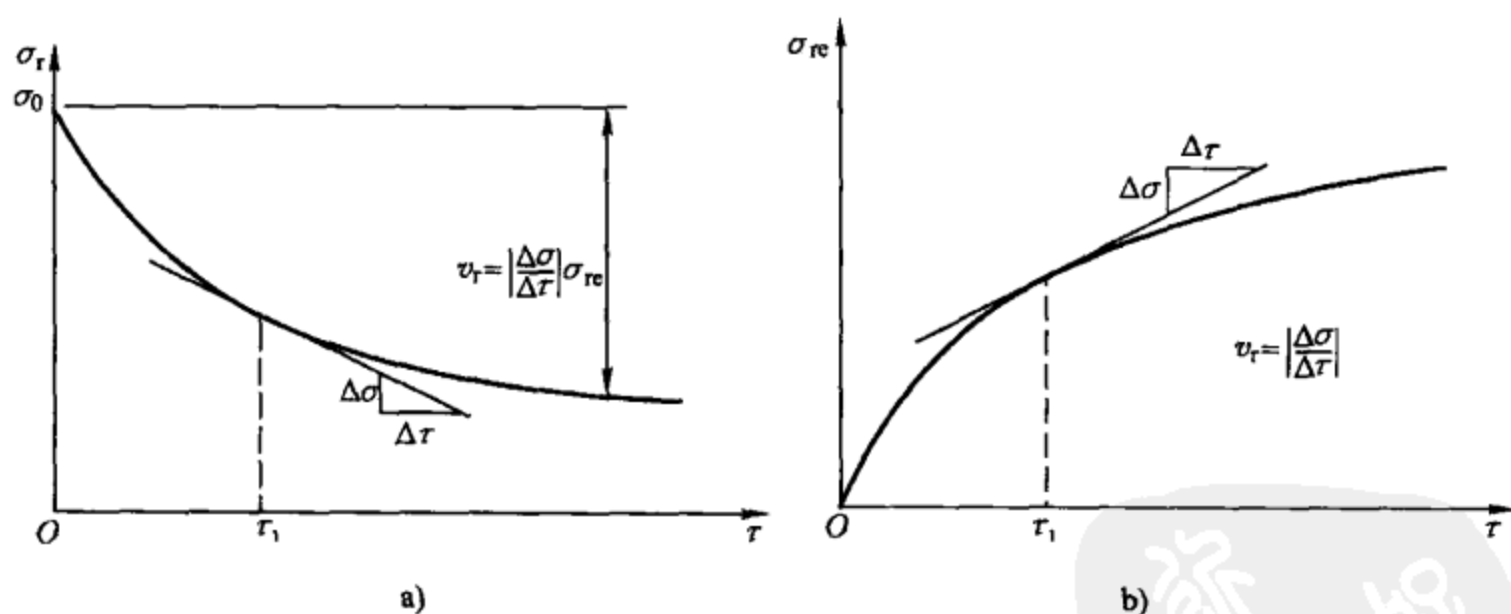


图 10-14 应力松弛曲线

a) 下降型曲线 b) 上升型曲线

### 10.3.2 应力松弛试样的制备

1) 切取样坯和制备试样的方法不应影响材料的金相组织和力学性能。

2) 机加工的拉伸应力松弛试样推荐采用直径为 10mm、标距为 100mm 的圆形横截面试样, 如图 10-15 所示。试样头部的形状和尺寸可根据引伸计结构和试样夹持方式设计。

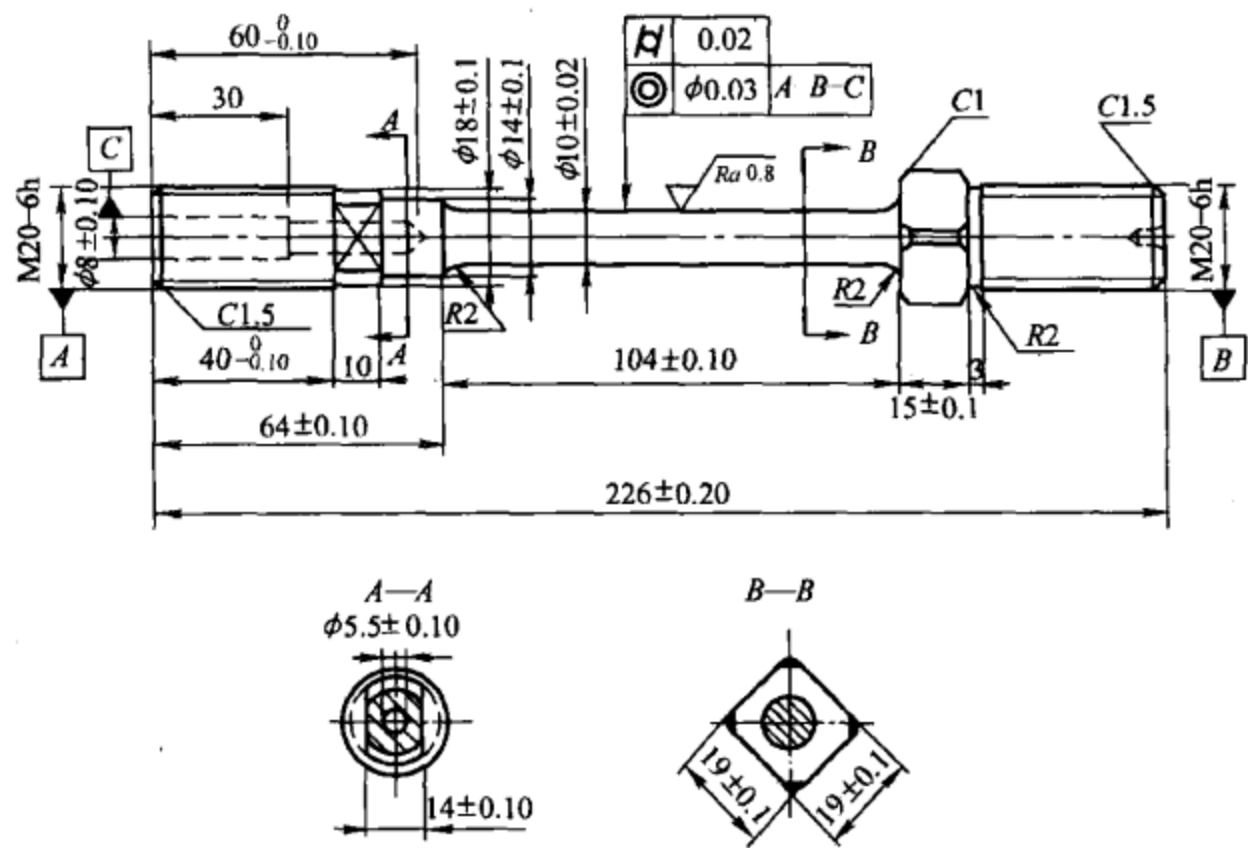


图 10-15 拉伸应力松弛试样

3) 弯曲应力松弛试样应使用等弯矩环状试样, 如图 10-16 所示。楔块材料一般应与试样材料相同。楔块厚度  $K$  由初始位移确定。测量试样位移的标记应使用维氏硬度压头压出。为保证长期试验时压痕清晰, 可在试样标记处固定或嵌镶耐热材料, 然后压出压痕。两压痕标记的中心连线应与直径为 53.6mm 的圆相切, 其偏差不超过  $\pm 1\text{mm}$ , 并且垂直于试样缺口的对称线。

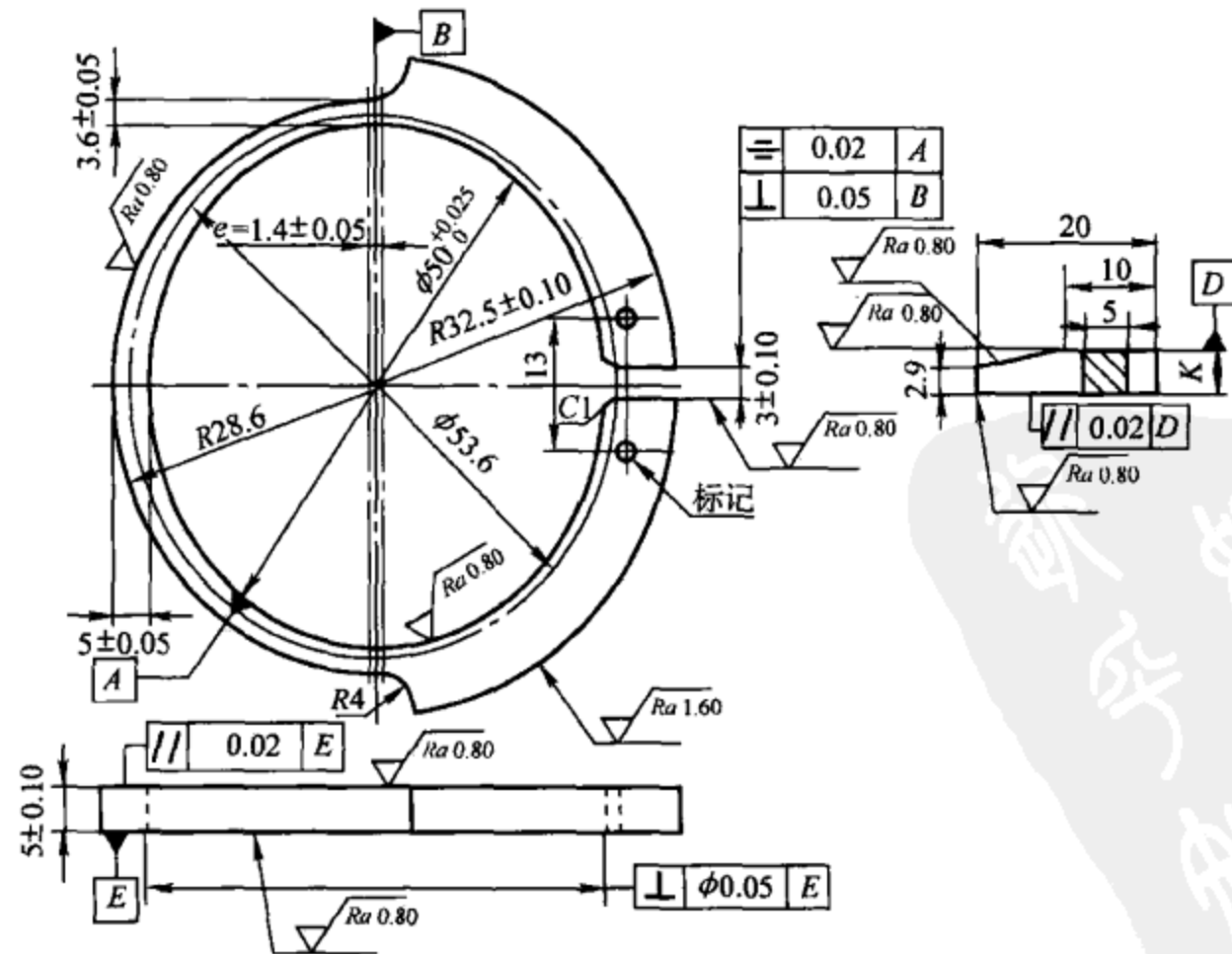


图 10-16 等弯矩环状弯曲应力松弛试样  
 $K$ —楔块厚度

### 10.3.3 应力松弛试验设备

#### 1. 试验机

1) 拉伸应力松弛试验机应能对试样施加准确的轴向拉伸试验力, 试验机力的示值误差不超过  $\pm 1\%$ 。试验机力的同轴度不大于 15%。试验机应定期校验。

2) 拉伸应力松弛试验机应具有连续自动调节试验力的装置, 以便在试验期间保持试样的初始应变或变形恒定。

3) 试验机应安装在温度稳定、无外来冲击和振动的环境中。

#### 2. 加热装置

加热装置应能将试样加热至规定温度, 并能在试验期间保持温度恒定。温度偏差和温度梯度应符合表 10-8 的要求。

表 10-8 温度偏差和温度梯度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

温度范围	温度偏差	温度梯度
<900	$\pm 3$	3
900 ~ 1000	$\pm 4$	4

#### 3. 温度测量仪器

1) 温度测量仪器误差不超过  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 分辨率不大于  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 并应定期校验。

2) 测温热电偶应符合 JJG 141—2000《工作用贵金属热电偶检定规程》或 JJG J351—1996《工业用廉金属热电偶检定规程》中 2 级热电偶要求。热电偶冷端温度应保持恒定, 偏差不超过  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4. 测量工具

1) 测量试样横截面尺寸的量具最小分度值不大于  $0.01\text{mm}$ 。

2) 测量压痕间距的量具最小分度值不大于  $0.001\text{mm}$ 。

### 10.3.4 试验要求

1) 在试样标距两端及中部各固定一支热电偶测量温度, 在经证明能满足表 10-8 中所规定的试验温度时, 热电偶的数量可适当减少。热电偶测量端应与试样表面良好热接触, 并应避免加热炉壁的直接热辐射。

2) 在升温期间应对试样施加预拉伸力, 预拉伸力不超过初始应力的 10%, 并且不大于  $10\text{N}/\text{mm}^2$ 。

3) 将试样加热至规定温度的时间一般为  $1 \sim 8\text{h}$ , 在加热过程中不得超过规定的温度范围, 保温时间一般为  $8 \sim 24\text{h}$ 。加热及保温总时间应以温度达到充分稳定为准。

4) 温度达到充分稳定后, 应迅速而无冲击地施加试验力, 施加全部初始试验



力的时间不应超过 10min。在零时间应立即使试样的初始总应变或总变形保持恒定,为此,应在施加试验力过程中不断调节总应变或总变形恒定控制系统,以保证在零时间处于平衡状态。在试验期间试样应变的波动应控制在  $\pm 2.5 \times 10^{-5}$  以内。

5) 在整个试验期间,试样的温度应控制在表 10-8 规定范围内。

连续或定时记录试验力和温度,并监测试样的初始总应变或总变形采用定时记录时,测量间隔应保证清晰地绘出应力松弛曲线。如无其他规定,应按下列时间间隔进行记录: 5min、10min、30min、1h、2h、4h、8h、16h、24h,以后每隔 24h 记录一次,直至试验结束。

### 10.3.5 高温拉伸应力松弛的测定

- 1) 按图样规定要求检查拉伸试样各部形状尺寸等。
- 2) 将合格试样安装在试验机的上下拉力夹具上,并安装好热电偶。
- 3) 按规定安装引伸计。
- 4) 根据试验应力及计算结果,配备试验力。
- 5) 对试样进行升温 and 保温,并在规定时间内达到试验温度和精度要求。
- 6) 在炉温稳定后开始加载。
- 7) 连续测量试样温度,定时记录试验力值,并监测试样的初始变形值。
- 8) 按一定的时间间隔进行测量,读取相应的松弛应力值,并作好记录。
- 9) 对试验数据进行处理,作出应力松弛曲线,并进行分析处理,确定松弛性能。

### 10.3.6 高温弯曲应力松弛的测定

- 1) 根据规定的初始应力,按下式计算初始位移  $\Delta_0$ 。

$$\Delta_0 = \frac{\sigma_0}{AE_t}$$

式中  $\Delta_0$ ——环状松弛试样初始位移,单位为 mm;

$\sigma_0$ ——初始应力,单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$A$ ——系数,单位为  $\text{mm}^{-1}$ ;

$E_t$ ——高温弹性模量,单位为  $\text{N/mm}^2$ 。

- 2) 在室温 ( $20 \pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$  下测量和记录试样压痕间距  $L$ ,然后打入楔块对试样施加位移,直至压痕间距达到按下式计算的  $L_0$  值。施加  $L_0$  的值应准确,偏差不超过  $\pm 0.01\text{mm}$ 。

$$L_0 = L + \Delta_0$$

式中  $L_0$ ——拉伸松弛试样的标距或环状松弛试样在初始位移时的压痕间距,单位为 mm;

$L$ ——拉伸松弛试样的标距或环状松弛试样试验前的压痕间距, 单位为 mm;

$\Delta_0$ ——环状松弛试样初始位移, 单位为 mm。

3) 将试样置于恒温装置内, 经一定时间间隔取出试样, 冷却至室温后, 除去楔块, 测量并记录两压痕间距  $L_1$ 。

4) 重新打入楔块, 保持  $L_0$  值。重复 3) 的试验程序, 得到不同时间间隔的  $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $\dots$ 、 $L_t$ ...

5) 测量压痕间距变化的时间间隔应保证能清晰地绘出应力松弛曲线。

6) 用下式计算环状弯曲应力松弛试样的剩余应力:

$$\sigma_r = AE_t(L_0 - L_r)$$

式中  $\sigma_r$ ——剩余应力, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$A$ ——系数, 单位为  $\text{mm}^{-1}$ ;

$E_t$ ——高温弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$L_0$ ——拉伸松弛试样的标距或环状松弛试样在初始位移时的压痕间距, 单位为 mm;

$L_r$ ——拉伸松弛试样在规定试验时间去除楔块后的压痕间距, 单位为 mm。

### 10.3.7 松弛曲线的建立与外推

金属材料通过松弛试验, 在每个规定的时间间隔内测得一系列剩余应力值, 即获得了大量原始数据点, 把这些点描绘在应力-时间坐标上, 再依次用光滑曲线将这些点拟合而成松弛曲线, 如图 10-17 所示。

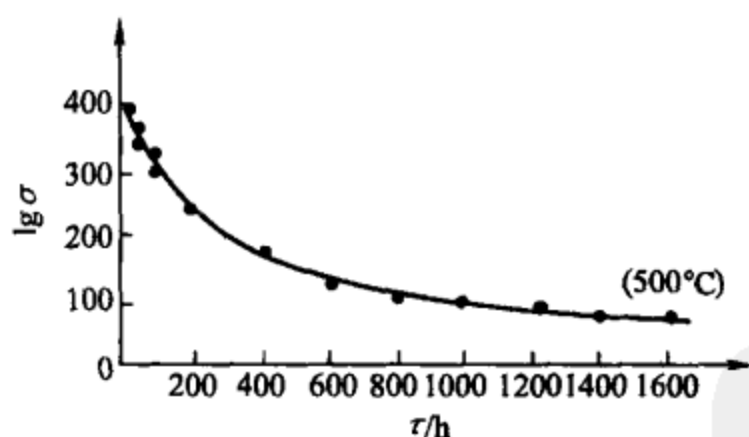


图 10-17 应力松弛曲线

应力松弛曲线建立后, 便能从图中获得该材料在某试验温度下的松弛应力。

# 第 11 章 金属材料的疲劳性能

## 11.1 疲劳性能相关知识

材料内部结构的不均匀造成应力传递的不平衡，有些地方会成为应力集中区。在循环应力或循环应变作用下，某些点逐渐产生了永久的结构变化，在力的持续作用下裂纹会越来越大，材料中能够传递应力的部分越来越少，导致在一定的循环次数后裂纹发生断裂的过程称为疲劳。

在载荷下进行试验以提供材料或零部件的某种疲劳数据的试验称为疲劳试验。疲劳试验按失效循环数的多少可分为高周疲劳试验和低周疲劳试验。高周疲劳试验以应力为基本控制参数，低周疲劳试验以应变为基本控制参数。按应力循环的类型可分为恒幅疲劳试验、程序疲劳试验和随机疲劳试验。按加载方式可分为拉压疲劳试验、旋转弯曲疲劳试验、平面弯曲疲劳试验、扭转疲劳试验和复合应力疲劳试验。按载荷和环境可分为室温疲劳试验、高温疲劳试验、低温疲劳试验、热疲劳试验、腐蚀疲劳试验、接触疲劳试验和冲击疲劳试验。按试样有无预制裂纹可分为常规疲劳试验和疲劳裂纹扩展试验。按试验目的可分为材料疲劳性能试验、疲劳设计系数试验和零部件疲劳试验。

机械零部件大多承受循环载荷，其破坏多数属于疲劳破坏。因此，疲劳试验对于机械设计具有重要意义。

## 11.2 扭应力疲劳试验

扭转疲劳极限 ( $\tau_D$ ) 是在指定循环基数下的中值扭转疲劳强度，循环基数一般取  $10^7$  或更高些。扭应力疲劳试验是测定扭转疲劳极限的一种试验方法。

### 11.2.1 试验原理

公称直径相同的试样装于扭转疲劳试验机上，并承受图 11-1 中 4~7 所示任一循环类型扭应力所对应的扭矩，连续试验至试样失效（指试样完全断裂或出现肉眼可见的疲劳裂纹）或至指定循环次数。

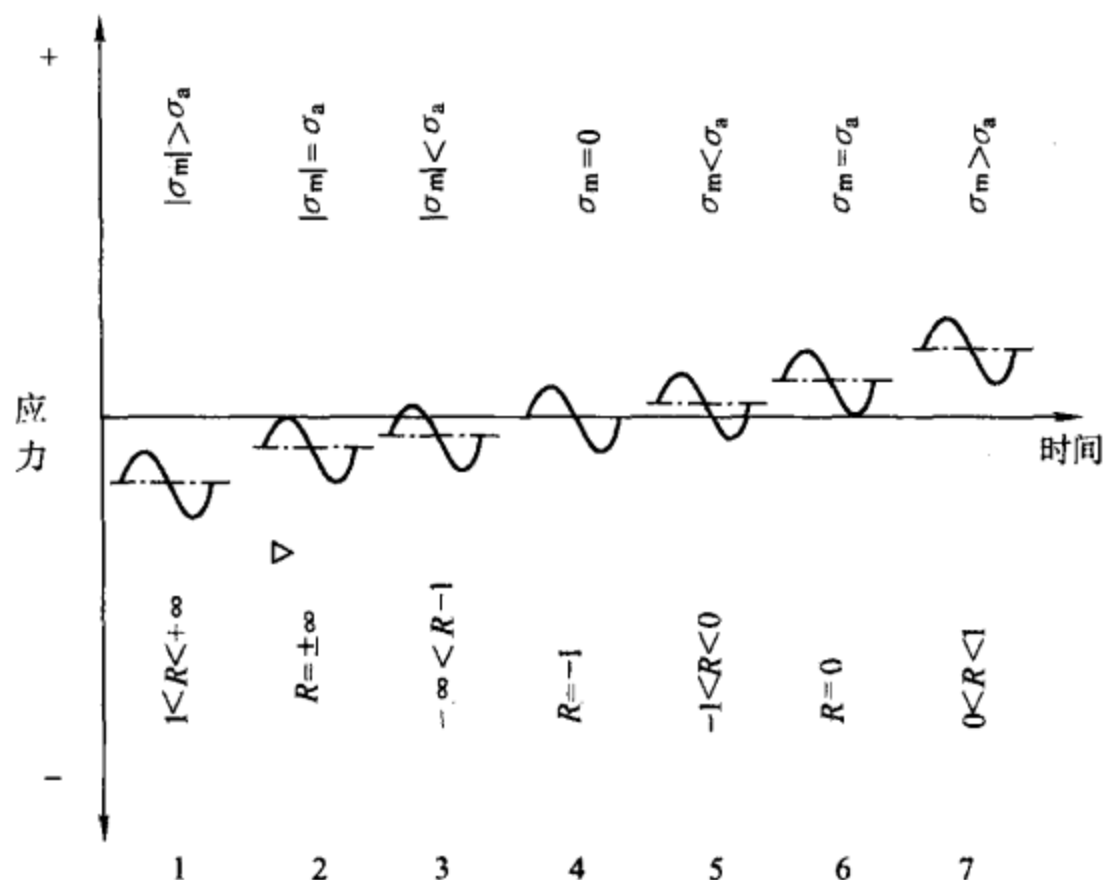


图 11-1 循环应力的类型

$\sigma_m$ —平均应力  $\sigma_a$ —在应力循环中最大应力和最小应力之间代数差的一半

$R$ —一个循环内力或应力最小值与最大值的比率

## 11.2.2 试样

### 1. 形状

扭应力疲劳试验的试样形状如图 11-2 所示。其工作部分可为圆柱形（图 11-2a）和漏斗形（图 11-2b），工作部分横截面均为圆形；夹持端的形状则根据试验机的夹头形状和试验材料设计。试样的典型夹持端如图 11-3 所示。

### 2. 尺寸

直径  $d$  的范围为 5.0 ~ 12.5mm，常用直径尺寸为 6.0mm、7.5mm、9.5mm，允许偏差为  $\pm 0.02\text{mm}$ 。

实际最小直径的测量准确度应不低于 0.01mm。测量直径  $d$  时，不要损伤试样表面。工作部分与夹持部分的同轴度误差应不大于 0.01mm。同批试验或对比试验所用的试样直径  $d$  应具有相同的公称值。

### 3. 制备

1) 制备试样时，机械加工不允许改变试样的冶金组织和力学性能，且引起的试样表面加工硬化应尽可能小。磨削精加工较硬材料的试样时，应提供足够的冷却液，确保试样表面不过热。

2) 工作部分与过渡圆弧的连接应圆滑，不应出现加工痕迹。粗加工后的试样毛坯如需热处理，应留有适当的加工余量，以保证精加工后能够消除热处理对试样表面的不良影响。

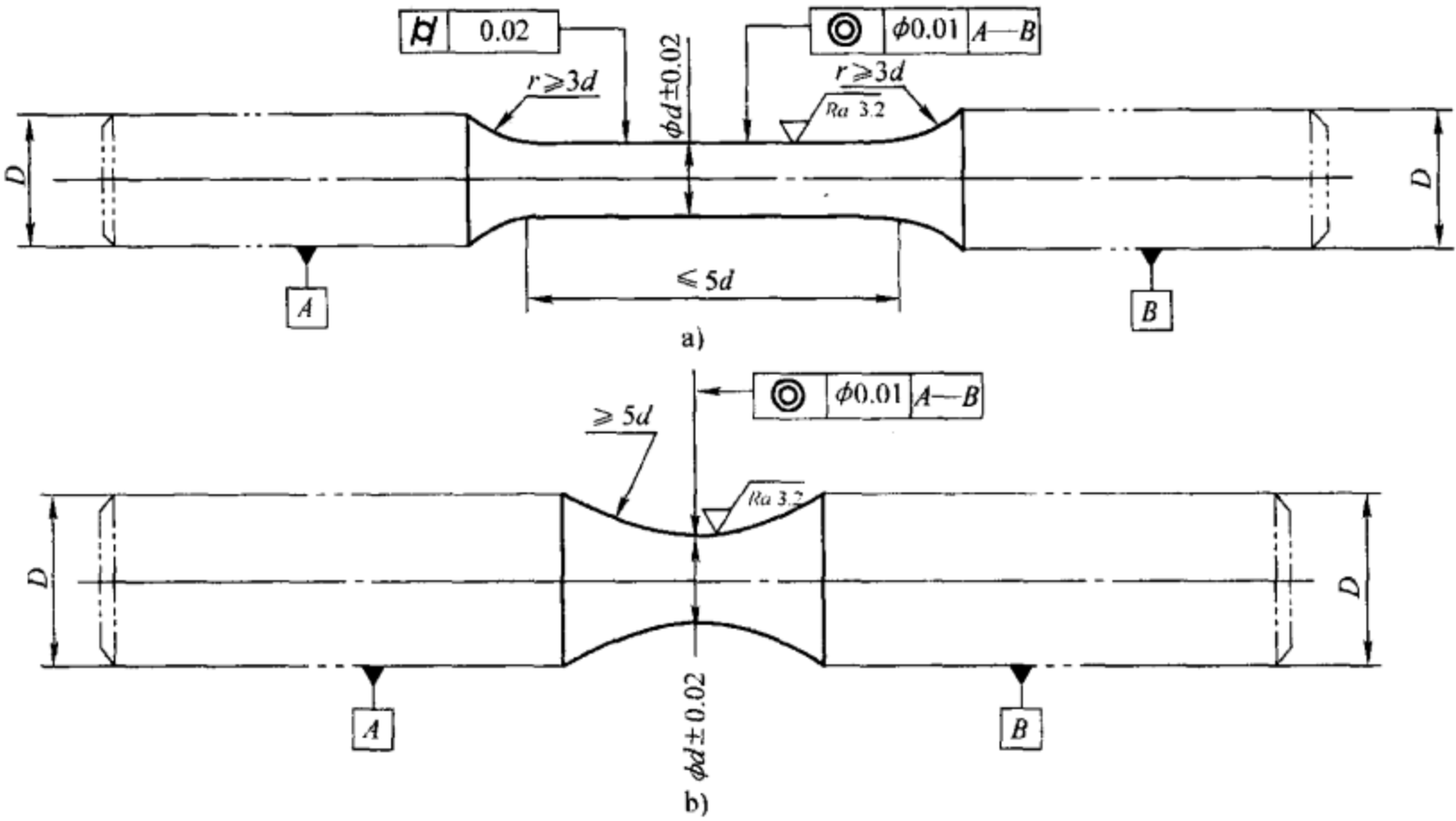


图 11-2 试样形状

a) 圆柱形试样 b) 漏斗形试样

$D$ —试样夹持端的直径或相对平面间的距离 (mm)  $d$ —试样工作部分的最小直径 (mm)

$r$ — $d$  与  $D$  之间的过渡圆弧半径或夹持端间的圆弧半径 (mm)

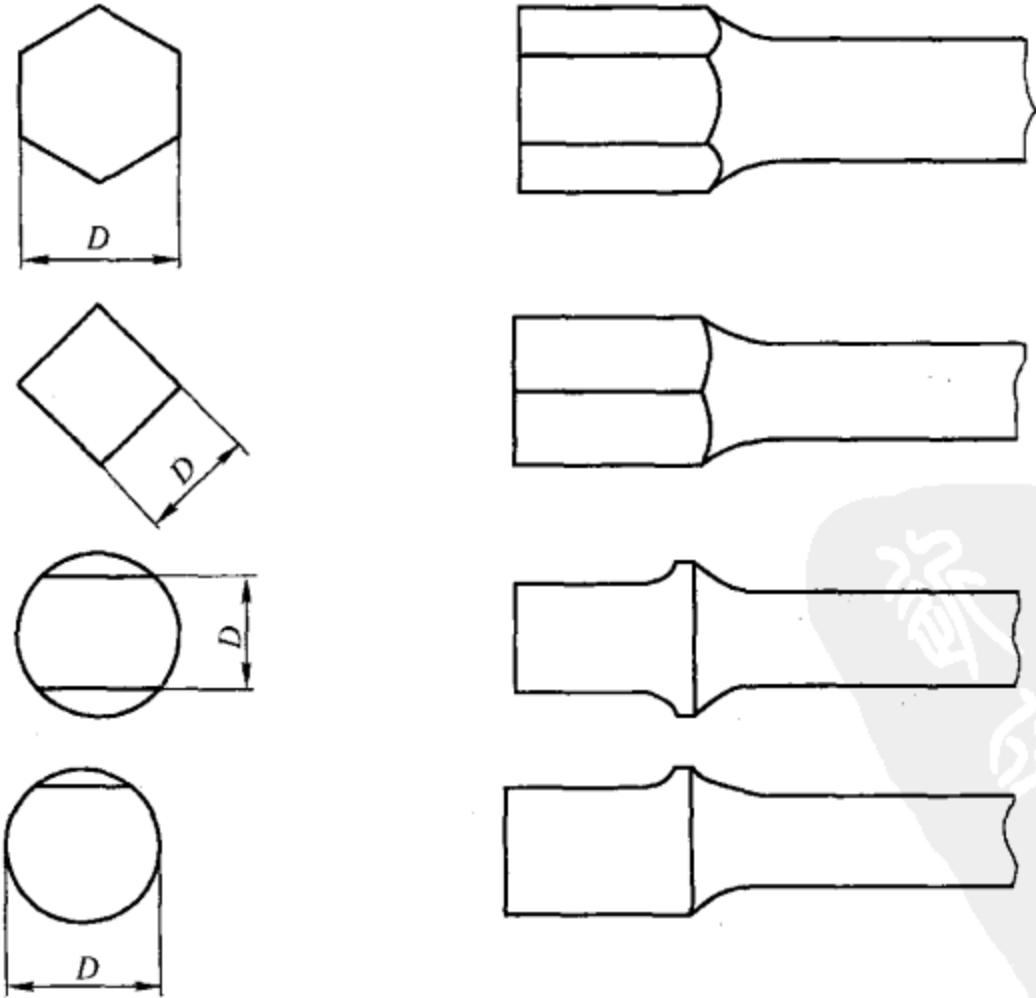


图 11-3 试样典型夹持端

$D$ —试样夹持端的直径或相对平面间的距离 (mm)

3) 不允许对试样进行矫直。

#### 4. 表面抛光

试样的工作部分经车削或磨削至公称尺寸后, 采用粒度较细且逐次变细的水磨砂纸或砂布, 沿其圆周方向进行手工或机械抛光。抛光的中间阶段可沿任一方向, 以消除较粗粒度的砂纸或砂布所产生的伤痕, 抛光的最后阶段必须沿圆周方向。抛光后, 试样工作部分的表面粗糙度  $Ra$  的最大允许值为  $0.32\mu\text{m}$ 。

### 11.2.3 试验设备及试验条件

#### 1. 试验机

1) 用适当方法校准的平均扭矩和扭矩范围的示值误差均不超过  $\pm 3\%$ , 或均不超过试验机使用满量程的  $\pm 0.5\%$ , 取其大值。

2) 试验过程中, 两夹头应保持同轴, 且夹头与试样不得有相对滑移。

3) 试验时应有工作可靠的扭矩控制装置、计数装置和试样失效或至指定循环时的停机装置。

4) 频率范围宽, 并能分级可调或连续可调。

#### 2. 试验条件

1) 试验温度为室温 ( $10 \sim 35^\circ\text{C}$ )。

2) 应力循环频率不应引起试样过热和试验机共振。

3) 装于试验机上的试样不允许承受所需规定扭应力以外的其他应力。

### 11.2.4 试验步骤

(1) 安装试样 将试样紧固在试验机上, 使试样与试验机两夹头保持良好的同轴度。

(2) 选定应力循环频率 根据所用的试验机型号、试样、应力大小或试验要求选定应力循环频率。

(3) 施加扭矩 开动试验机, 其应力循环频率调至选定值之后, 将规定扭应力所需的相应扭矩施加到试样上。

### 11.2.5 扭转疲劳性能的测定

1) 试验一般在预计  $(0.95 \sim 1.05)\tau_D$  ( $\tau_D$  为扭转疲劳极限) 范围的 3 级左右等间距应力水平下进行, 应力增量一般为预计  $\tau_D$  的  $3\% \sim 5\%$ 。第一根试样的应力水平应略高于预计  $\tau_D$ , 在每级应力水平下试验的试样数量一般为两根以上。

2) 试验顺序如图 11-4 所示。

如果半数试样试验至指定循环数而不失效的最高应力水平, 但在比此应力水平低一级的应力水平下, 试验至指定循环数而不失效的试样必须超过半数, 如图 11-

4a、b 所示，则此时所得应力水平即为扭转疲劳极限。

如果在某级应力水平下，超过半数的试样试验未至指定循环数已失效，而在比此应力水平低一级的应力水平下，试样试验至指定循环数全不失效时，则上述两级应力水平的平均值为扭转疲劳极限，如图 11-4c 所示。

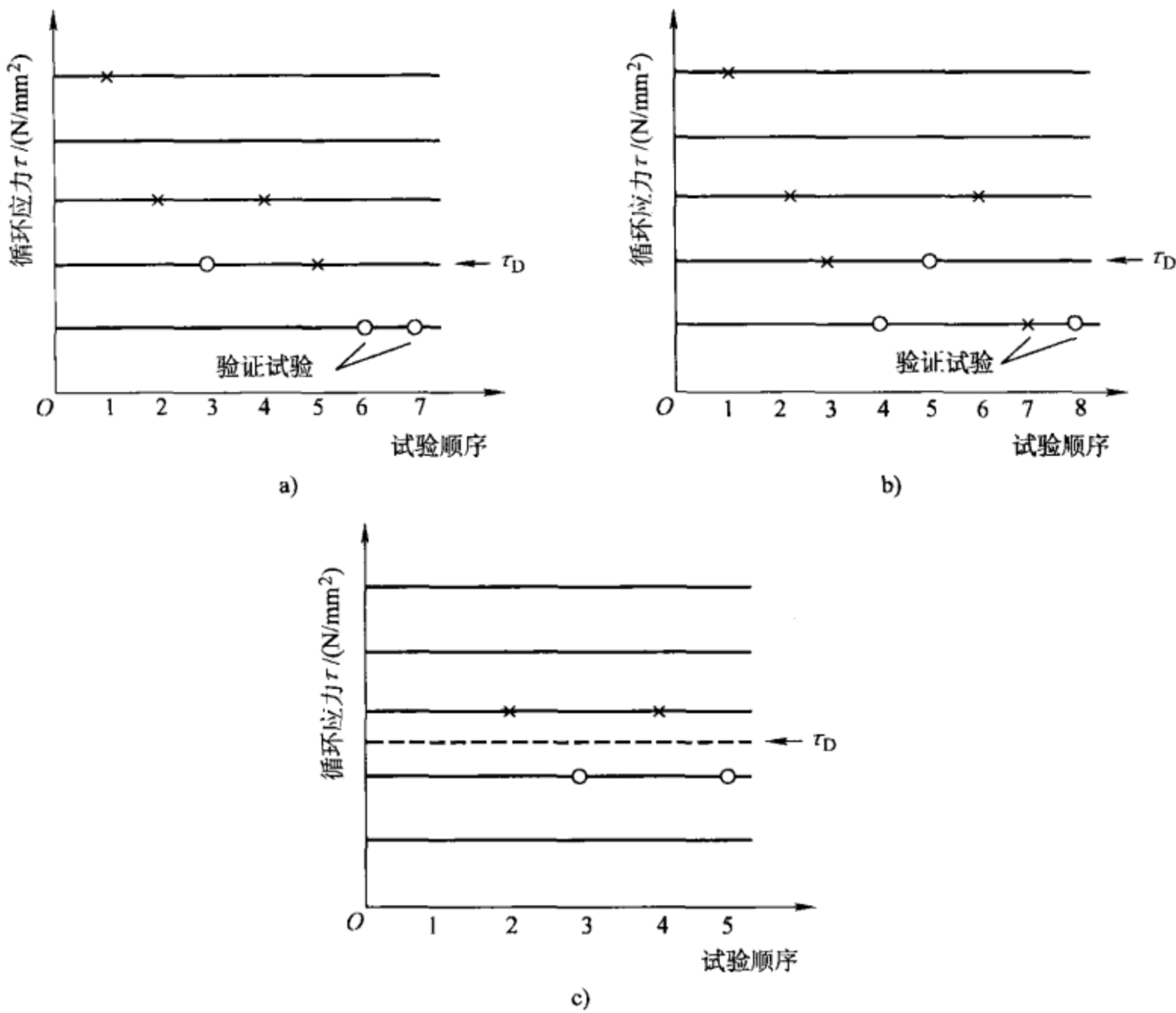


图 11-4 测定  $\tau_D$  的试验顺序

a) 第一类试验顺序   b) 第二类试验顺序   c) 第三类试验顺序  
x—失效   o—未失效

11.2.6 试验结果的处理

- (1) 列表法 表中应包括如下内容：
- 1) 试验顺序。
  - 2) 试样号。



- 3) 试样形状、尺寸及表面粗糙度。
- 4) 试验中的频率、应力、循环次数。
- 5) 中等寿命区的平均寿命和长寿命区的扭转疲劳极限。

(2) 图示法  $S-N$  (应力-疲劳寿命) 曲线是常用的一种表示疲劳试验结果的方法, 绘制  $S-N$  曲线时, 以应力为纵坐标, 以疲劳寿命为横坐标。疲劳寿命采用对数坐标, 应力采用线性坐标或对数坐标。用逐点描迹法或最小二乘法, 拟合上述试验数据点即成  $S-N$  曲线。

### 11.3 滚动接触疲劳试验

金属材料滚动接触疲劳试验是一种模拟轴承、齿轮、轮箍等滚动接触零件工况的失效试验, 它可以为这些零件的设计、选材、制订热处理工艺提供依据。

#### 11.3.1 试验术语

(1) 接触应力 由于接触物体之间集中于局部接触区的相互压力而产生的应力, 也称为赫兹应力。

(2) 接触疲劳 材料在循环接触应力作用下, 产生局部永久性累积损伤, 经一定循环次数后, 接触表面发生麻点、浅层或深层剥落的过程。

(3) 接触疲劳寿命 试样接触表面在循环接触应力作用下直至疲劳失效时所经受的应力循环次数。

(4) 特征寿命 服从威布尔分布, 失效概率为 63.2% 时的子样接触疲劳寿命。

(5) 额定寿命 服从威布尔分布, 失效概率为 10% 时的子样接触疲劳寿命。

(6) 中值寿命 服从威布尔分布, 失效概率为 50% 时的子样接触疲劳寿命。

(7) 滑差率 陪试件滚动速度与试样滚动速度之差与陪试件滚动速度之比的百分率。

(8)  $N$  次循环的中值接触疲劳强度 母体的 50% 能经受  $N$  次循环的接触应力水平的估计值。

#### 11.3.2 试验原理

将一恒载荷施加于滚动或滚动加滑动接触的试样, 使其接触表面受到循环接触应力的作用, 测定试样发生接触疲劳失效的应力循环次数。

#### 11.3.3 试样和陪试件

##### 1. 选材

试验材料要进行检验, 必须符合有关标准要求。不同工艺的对比试验, 应采用



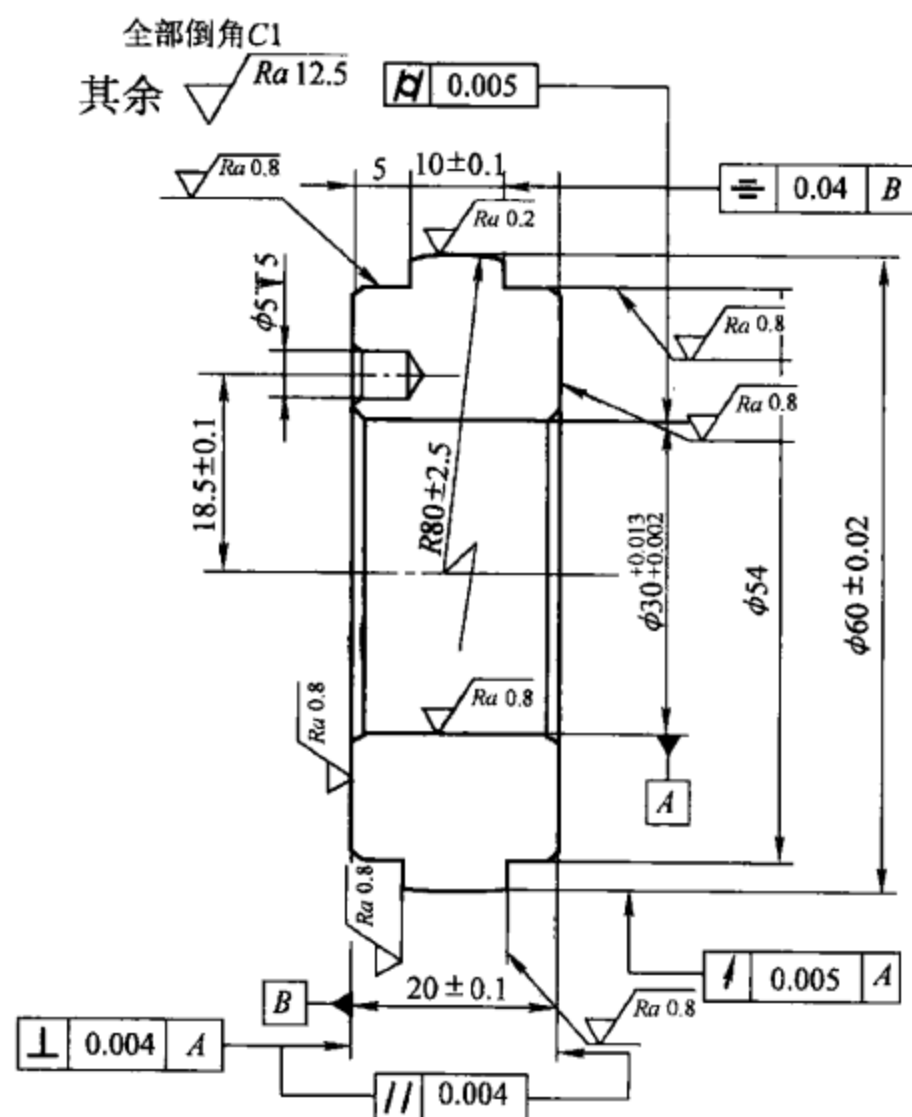


图 11-6 JP-2 试样

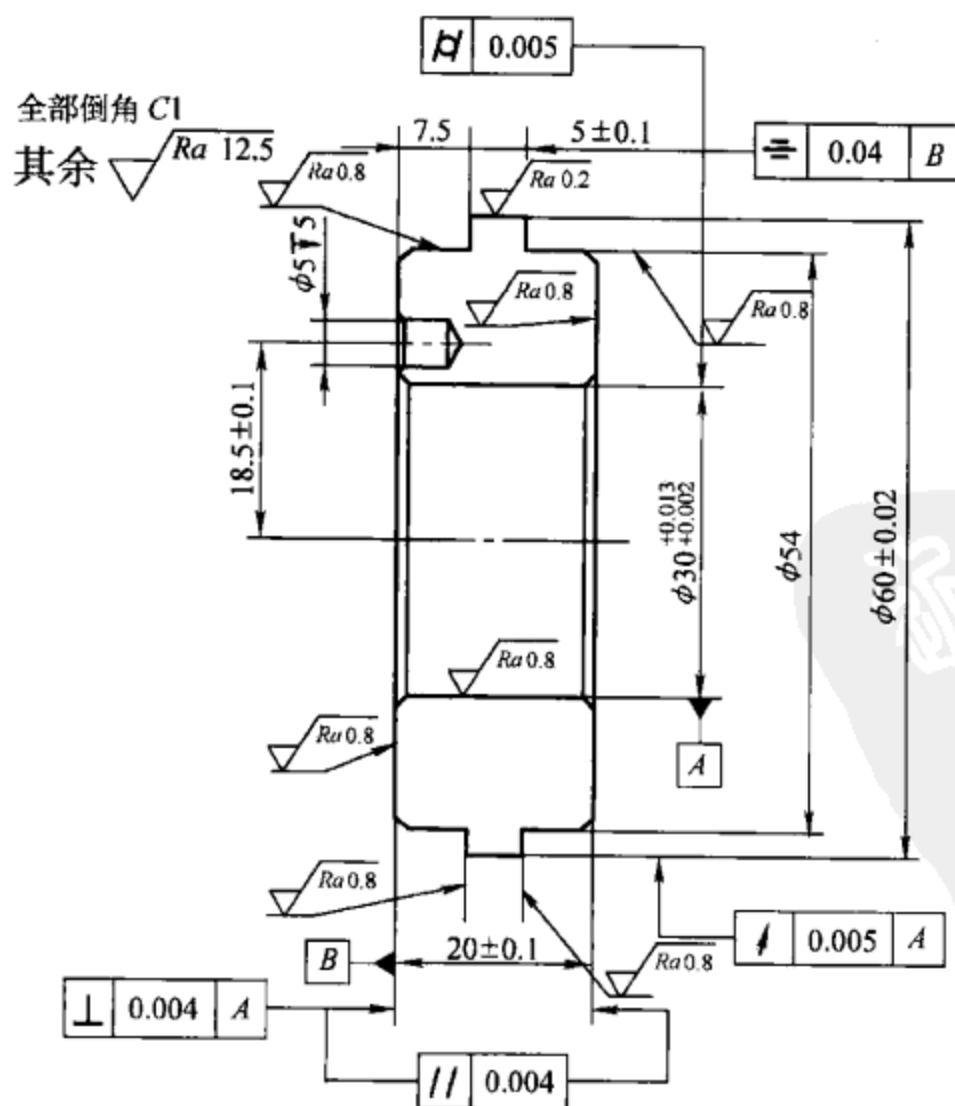


图 11-7 JP-3 试样

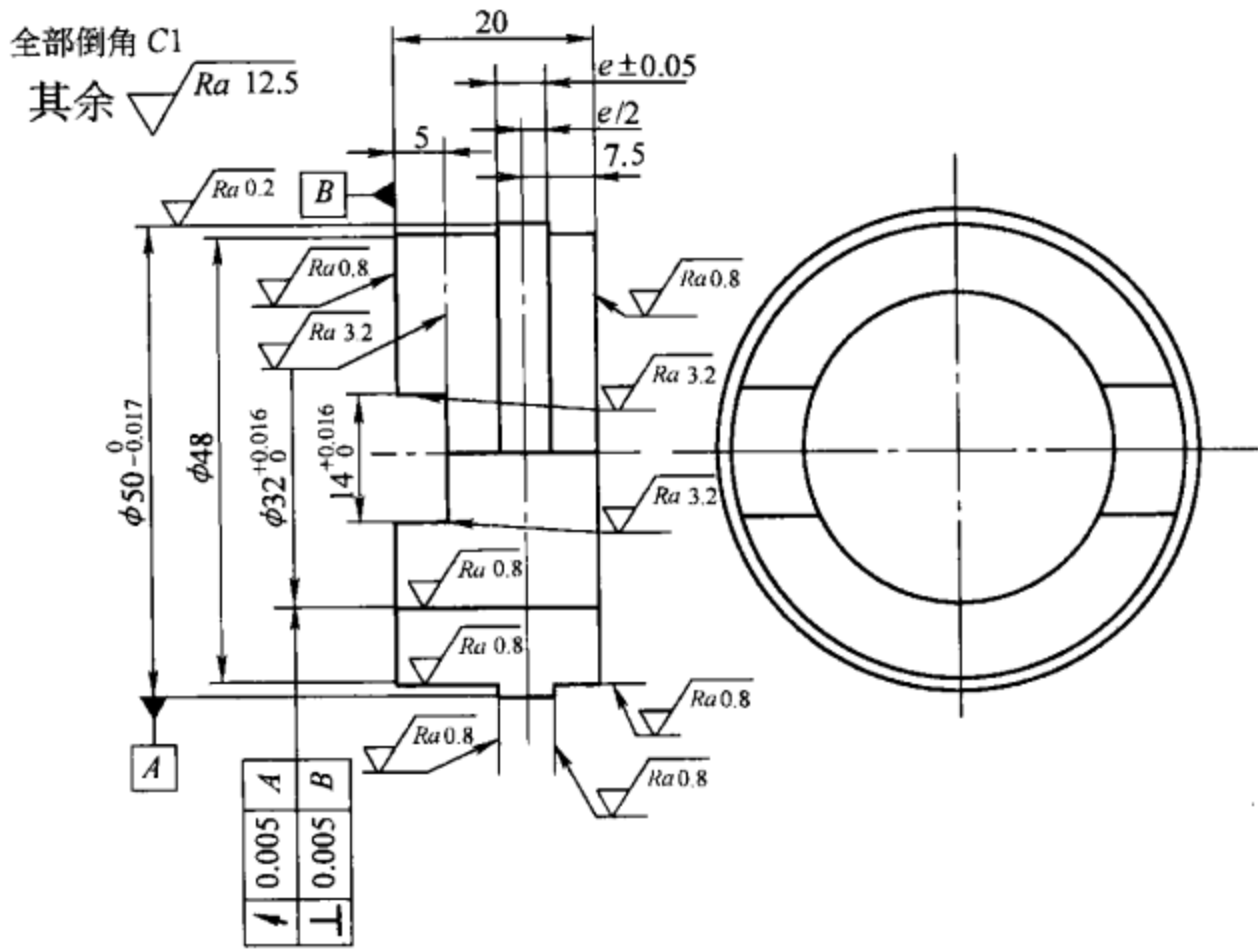


图 11-8 JP-4 试样

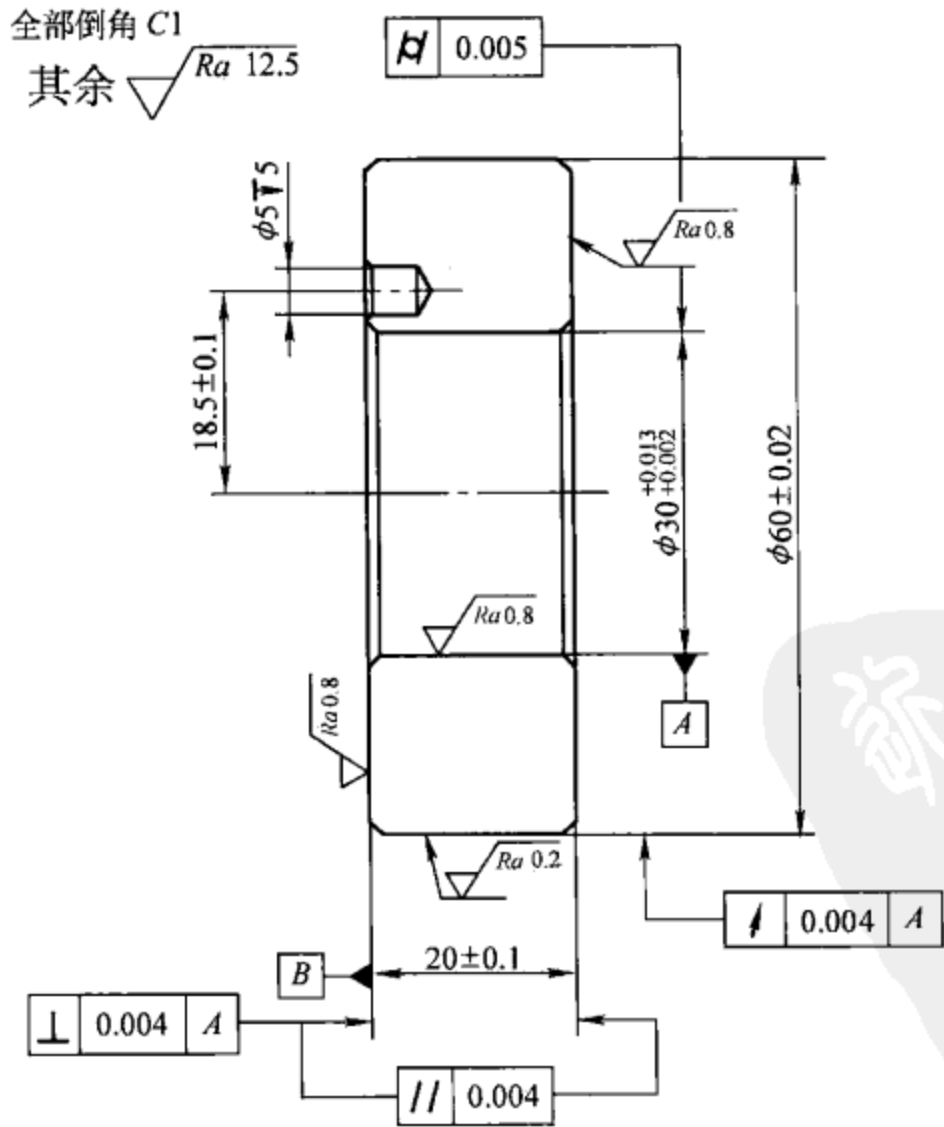


图 11-9 PS-1 试样

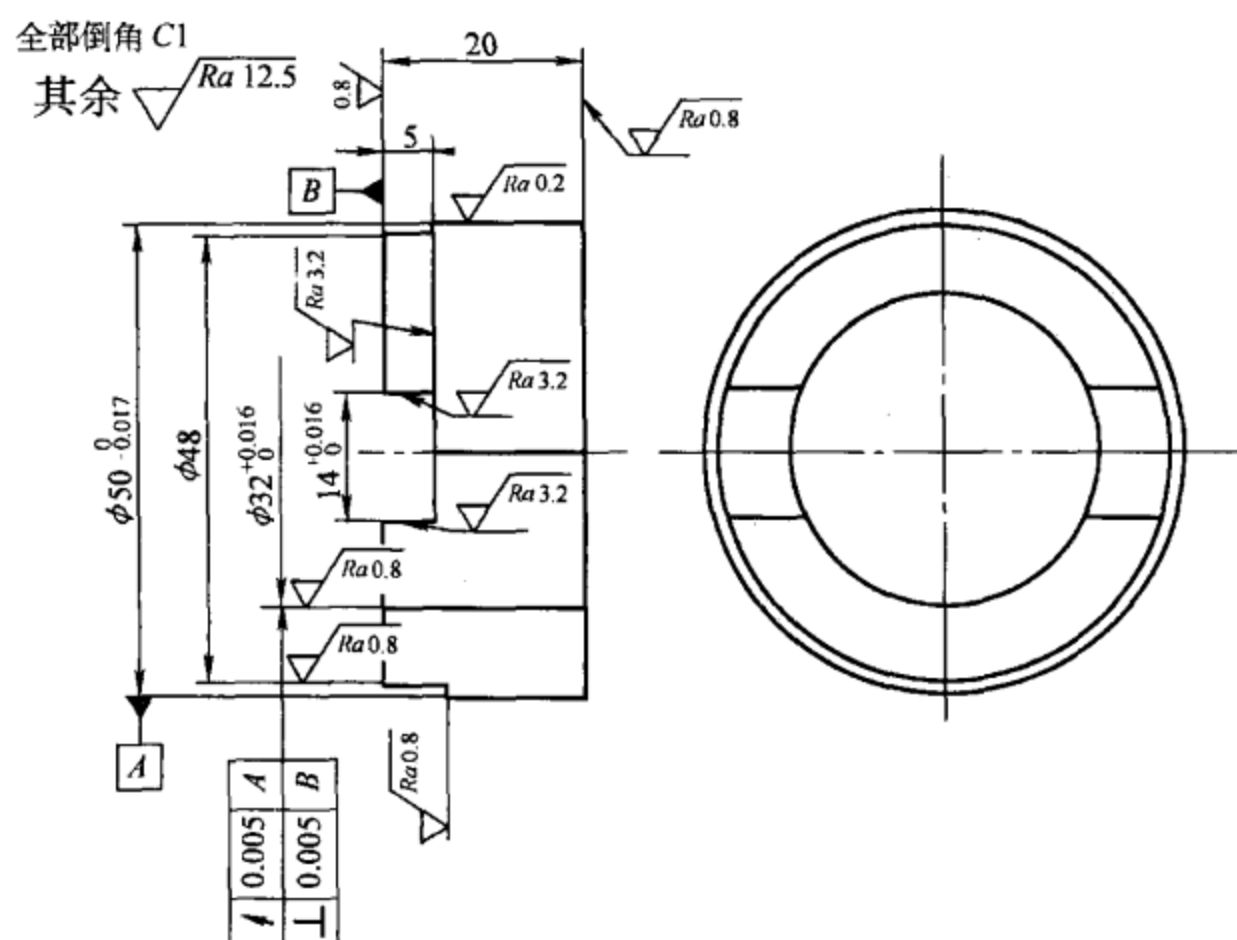


图 11-10 PS-2 试样

### 3. 机加工

机加工试样和陪试件的工序一般是粗车、精车、毛坯热处理（根据不同材料及要求而定）、粗磨和精磨。

### 4. 热处理

硬度不小于 40HRC 情况下，同一批试样、陪试件的硬度差应不大于 2HRC，同一试样、陪试件本身的硬度差应不大于 1.5HRC，组与组之间的试样、陪试件的硬度差可根据试验目的确定。

## 11.3.4 试验设备及试验条件

### 1. 试验机

- 1) 试验机应安装在无冲击、无强烈振动、无腐蚀的干燥试验室内。
- 2) 试样、陪试件轴线在铅垂平面内，平行度误差应不大于 0.02mm。
- 3) 试样、陪试件轴线在水平平面内，平行度误差应不大于 0.02mm。
- 4) 主轴在安装试样和陪试件位置处的径向圆跳动量应不大于 0.01mm，端面圆跳动量应不大于 0.01mm。
- 5) 静态载荷误差应不大于  $\pm 1\%$ 。
- 6) 试验机应配备自动停机装置，试样发生疲劳失效时能及时自动报警停机，无误停和滞停现象，试样疲劳点的检测灵敏度可调。

## 2. 试验条件

1) 试验机的轴承、齿轮和试样,应采用符合 GB 443—1989《L-AN 全损耗系统用油》规定的 L-AN22。

2) 试验过程中试样润滑出口油温不应超过  $55^{\circ}\text{C}$ , 其偏差应在  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  以内。

3) 润滑油应定期抽样进行粘度、机械杂质和水分检查,不符合技术条件要求者不应继续使用。应严防灰尘、金属杂质和水分进入润滑油及润滑系统。试验机连续工作,每半年至少换油一次;间断工作,每年至少换油一次。

### 11.3.5 试验步骤

#### 1. 试样的安装

试样和陪试件在安装之前,用煤油将其清洗干净。试样装于上主轴,陪试件装于下主轴。试样与陪试样接触后,在摇摆头的压力下测试样径向圆跳动量应不大于  $0.03\text{mm}$ 。

#### 2. 试验要点

如试验机的载荷系统为砝码杠杆载荷系统,应把加力一级杠杆调到水平。试样加预载荷后开机,然后施加主载荷。不允许带主载荷开机、停机(自动停机除外)。试验过程中应保持载荷恒定,无特殊情况下不得中途停试。

#### 3. 疲劳失效的判断

- 1) 深层剥落面积不小于  $3\text{mm}^2$ 。
- 2) 在  $10\text{mm}^2$  面积内出现麻点率达 15% 的损伤。

#### 4. 试验无效的判断

- 1) 载荷吊杆刀口脱出,杠杆比发生变化,载荷不准。
- 2) 试样和陪试件互相装错位置。
- 3) 振动加剧,试样表面局部有压痕或凹坑。
- 4) 陪试件疲劳剥落,损伤了试样表面。
- 5) 润滑不足,试样表面烧伤。
- 6) 由于主轴轴承疲劳或主轴变形,发生强烈振动。
- 7) 试样和陪试件松动、滑移。
- 8) 控制仪器失灵,试样剥落长度大于  $5\text{mm}$ 。

### 11.3.6 $N$ 次循环的中值接触疲劳强度的测定

第一个试样的应力水平应选择略高于预计的中值接触疲劳强度,试验一般在 3~5 级等间距应力水平下进行,应力增量一般约取预计的中值接触疲劳强度的 3%~5% 左右。每级应力水平下一般试验两个以上的试样。试验顺序如图 11-11 ~ 图 11-13 所示。

1) 取半数试样试验至指定循环数  $N$  而不失效的最高应力水平, 或在比此应力水平低一级的应力水平下, 试验至  $N$  次循环而不失效的试样必须超过半数, 如图 11-11 和图 11-12 所示。用这种方法处理试验结果所得应力水平, 即为  $N$  次循环的中值接触疲劳强度  $\sigma_{R(N)}$ 。

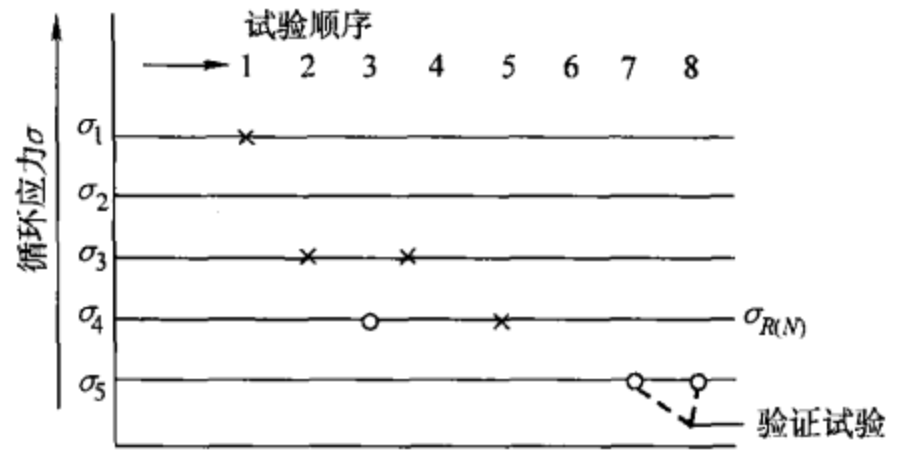


图 11-11 第一种情况的试验顺序

2) 如果在某级应力水平下, 超过半数的试样试验未达  $N$  次循环已失效, 而在比此应力水平低一级的应力水平下, 试样试验至  $N$  次循环而全部不失效时, 则上述两级应力水平的平均值确定为  $N$  次循环的中值接触疲劳强度  $\sigma_{R(N)}$ , 如图 11-13 所示。

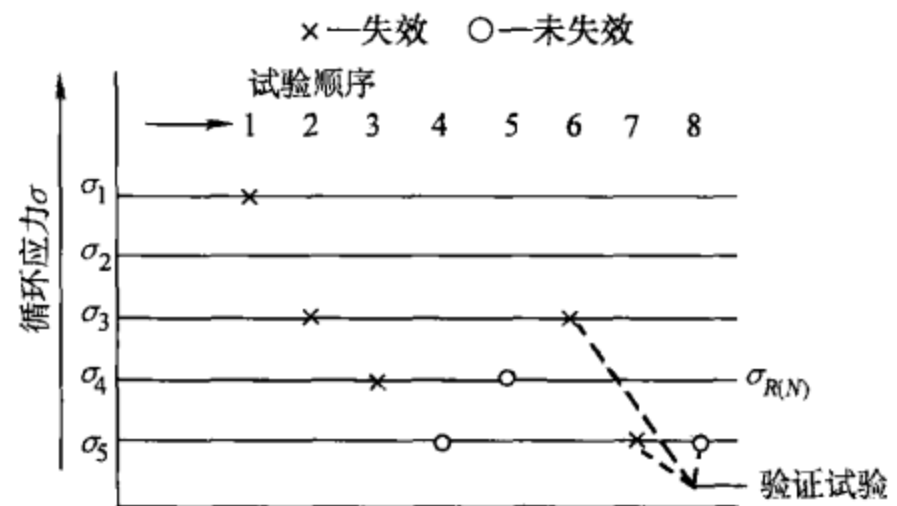


图 11-12 第二种情况的试验顺序

3) 指定循环数  $N$ , 应根据材料和使用要求确定, 一般可取  $N = 10^7$  次。

### 11.3.7 试验结果处理

#### 1. 试验应力的选择

1) 同一应力水平下的对比试验, 试验应力应选择近零件实际工作应力范围的上限。对于轴承钢、渗碳钢及其他高强度材料, JP-1 号试样的接触应力选择  $5000\text{N/mm}^2$  左右; JP-2 号试样的接触应力选择  $3500\text{N/mm}^2$  左右; JP-3 号和 JP-4 号试样的接触应力选择  $2500\text{N/mm}^2$  左右。低强度钢和软表面试样的试验应力需根据材料实际强度调试确定。

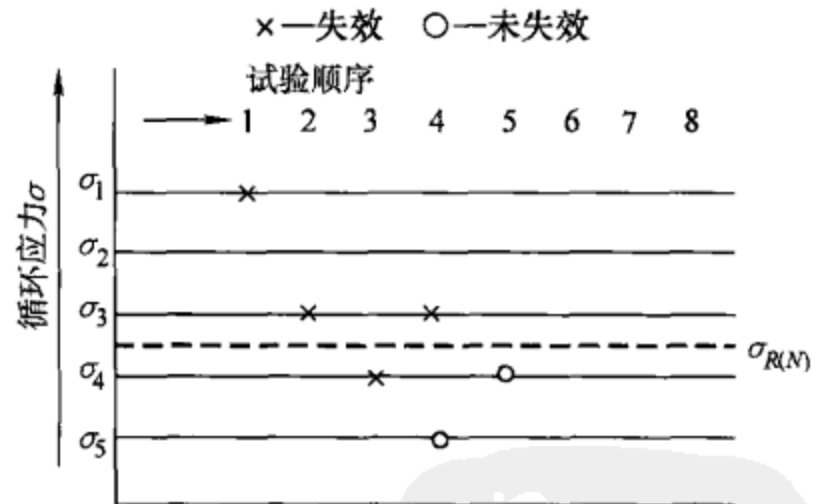


图 11-13 第三种情况的试验顺序

2) 在零件实际工作应力范围内选择 4 ~ 5 级应力水平, 最低试验应力应选择实际工作应力的下限, 然后逐级上升确定各试验应力。相邻两级应力的级差根据接触方式确定。点接触的应力级差选择  $250 \sim 400\text{N/mm}^2$ ; 线接触的应力级差选择  $18 \sim 300\text{N/mm}^2$ 。



## 2. 接触应力的计算

点接触和线接触最大应力分别按下面的公式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{\pi\alpha\beta} \times \sqrt[3]{\frac{3}{2} \times \frac{F(\Sigma\rho)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2}}$$

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{F(\Sigma\rho)}{\pi L \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}}$$

式中  $\sigma_{\max}$ ——最大接触应力，单位为  $\text{N/mm}^2$ ；

$\pi$ ——常数，取 3.1416；

$\alpha$ 、 $\beta$ ——点接触变形系数；

$F$ ——施加于试样上的载荷，单位为  $\text{N}$ ；

$\mu_1$ ——试样的泊松比；

$\mu_2$ ——陪试件的泊松比；

$E_1$ ——试样的弹性模量，单位为  $\text{N/mm}^2$ ；

$E_2$ ——陪试件的弹性模量，单位为  $\text{N/mm}^2$ ；

$L$ ——试样接触长度，单位为  $\text{mm}$ ；

$\rho$ ——试样与陪试件接触处的主曲率，单位为  $\text{mm}^{-1}$ ；

$\Sigma\rho$ ——试样、陪试件主曲率之和，单位为  $\text{mm}^{-1}$ ，其计算公式为

$$\begin{aligned}\Sigma\rho &= \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22} \\ &= \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}\end{aligned}$$

$R_{11}$ ——试样垂直于滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{12}$ ——试样沿滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{21}$ ——陪试件垂直于滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{22}$ ——陪试件沿滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ 。

## 3. 接触应力循环次数的计算

试样接触应力循环次数按下式计算：

$$N = nt$$

式中  $N$ ——接触应力循环次数；

$n$ ——试样转速，单位为  $\text{r/min}$ ；

$t$ ——试验时间，单位为  $\text{min}$ 。

## 4. 油膜参数的选择和计算

(1) 油膜参数的选择 对于材料因素的对比试验，油膜参数推荐  $\lambda > 1.8$ ，使

试样工作表面处于部分弹流或接近弹流润滑状态。

(2) 油膜参数的计算 点接触和线接触的油膜参数分别按下面公式计算：

$$\lambda = \frac{h_0}{Ra} = \frac{1}{Ra} \times 2.04 \phi^{0.74} (\eta_0 B v)^{0.74} R^{0.407} \left( \frac{E'}{F} \right)^{0.074}$$

$$\lambda = \frac{h_0}{Ra} = \frac{1}{Ra} \times 2.65 \eta_0^{0.7} v^{0.7} B^{0.54} R^{0.43} q^{-0.13} E'^{-0.03}$$

式中  $\lambda$ ——油膜参数；

$h_0$ ——最小油膜厚度，单位为  $\mu\text{m}$ ；

$Ra$ ——试样综合表面粗糙度，单位为  $\mu\text{m}$ ，其计算公式为

$$Ra = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}$$

$Ra_1$ ——试样表面粗糙度，单位为  $\mu\text{m}$ ；

$Ra_2$ ——陪试件表面粗糙度，单位为  $\mu\text{m}$ ；

$\phi$ ——漏泄修正系数，其计算公式为

$$\phi = \left( 1 + \frac{2}{3} \times \frac{R_y}{R_x} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}}$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{1y}} + \frac{1}{R_{2y}}$$

$R_x$ ——试样和陪试件垂直于滚动方向的当量曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_y$ ——试样和陪试件沿滚动方向的当量曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{1x}$ ——试样垂直于滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{2x}$ ——陪试件垂直于滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{1y}$ ——试样沿滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$R_{2y}$ ——陪试件沿滚动方向的曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$\eta_0$ ——大气压下润滑油的粘度，单位为  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$ ；

$B$ ——压力系数，单位为  $\text{mm}^2/\text{N}$ ；

$v$ ——当量滚动速度，单位为  $\text{mm}/\text{s}$ ，其计算公式为

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$v_1$ ——试样的滚动速度，单位为  $\text{mm}/\text{s}$ ；

$v_2$ ——陪试件的滚动速度，单位为  $\text{mm}/\text{s}$ ；

$R$ ——试样与陪试件的综合曲率半径，单位为  $\text{mm}$ ；

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{1y}} + \frac{1}{R_{2x}} + \frac{1}{R_{2y}}$$

$F$ ——加于试样上的径向载荷, 单位为 N;

$E'$ ——试样和陪试件的综合当量弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ , 其计算公式为

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)$$

$E_1$ ——试样弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$E_2$ ——陪试件弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$\mu_1$ ——试样泊松比;

$\mu_2$ ——陪试件泊松比;

$q$ ——单位长度载荷, 单位为  $\text{N/mm}$ , 其计算公式为

$$q = \frac{F}{L}$$

$L$ ——试样接触长度, 单位为 mm;

$F$ ——施加于试样的径向载荷, 单位为 N。

### 5. 滑差率的选择

试样和陪试件的滑差率, 主要根据零件工作滑差范围进行选择。对于模拟滚动轴承的试验, 选用 5% 的滑差率为宜; 对于模拟齿轮的试验, 选用 10% ~ 20% 左右的滑差率为宜。模拟其他零件的试验, 可根据零件实际工况确定恒滑差率或变滑差率, 一般采用 10% 的滑差率。

### 6. 转速的选择

试验机主轴的转速应根据试验载荷和试样的滑差率来选择, 重载荷大滑差率可选择 1500 ~ 2000r/min; 轻载荷小滑差率可选择 2000 ~ 3000r/min。对于单因素的对比试验, 如滑差率为 5%, 转速可选择 3000r/min; 如滑差率为 15% 左右, 转速可选择 2000r/min。

### 7. 子样容量的选择

- 1) 筛选试验的子样数量不少于 6 个, 定性比较试验的子样数量不少于 12 个。
- 2) 为制订材料标准和改进设计等提供依据的高可靠性 (可靠度在 90% 以上) 试验, 一般子样数量不少于 16 个。

### 8. 试验方案的选择

1) 筛选试验和定性比较试验, 建议测定  $P-N$  (存活率-寿命) 曲线。高可靠度试验, 一般需测定  $P-S-N$  (存活率-应力-寿命) 曲线。

2) 测定  $P-N$  曲线, 可以进行完全失效试验或定数截尾试验, 其截尾数量不大于子样数量的 20%, 求得  $P-N$  曲线。

3) 测定  $P-S-N$  曲线, 一般选取 4~5 级应力水平, 在每一应力水平下测定  $P-N$  曲线。根据各应力水平下的  $P-N$  曲线, 求得  $P-S-N$  曲线。

## 11.4 旋转弯曲疲劳试验

### 11.4.1 试验术语

(1) 疲劳 金属材料在交变应力或应变作用下产生裂纹或失效, 材料性能发生变化的过程。

(2) 杠杆比 ( $M_{Lr}$ ) 施力杠杆比, 对于同类的旋转弯曲疲劳试验机, 它是由试验机厂家提供的固定数值。

(3) 力臂 ( $L$ ) 支点与加力点之间的距离, 如图 11-14 所示, 对于四点弯曲加力  $L_1$  和  $L_2$  应相等。

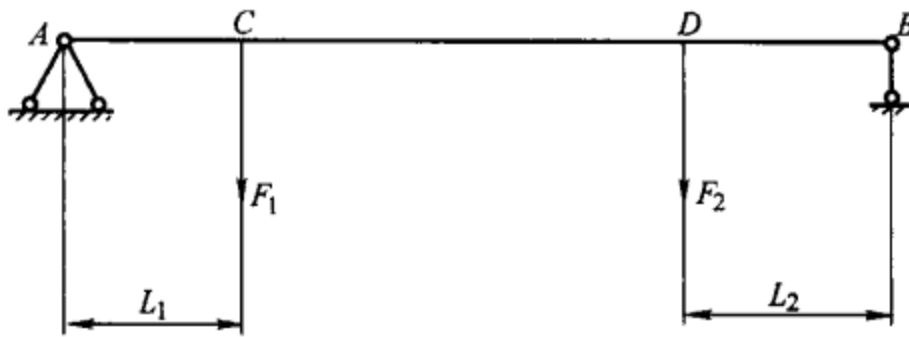


图 11-14 力臂测量的原理图

(4) 耐久极限应力 对应于规定循环周次, 施加到试样上而试样没有发生失效的应力范围。

### 11.4.2 试验原理

试样旋转并承受一定的弯矩, 产生弯矩的力恒定不变且不转动。试样可装成悬臂, 在一点或两点加力; 也可装成横梁, 在四点加力。试验一直进行到试样失效或超过预定应力循环次数。

### 11.4.3 试样

#### 1. 试验部分的形状

1) 试验部分可以是圆柱形 (见图 11-15 ~ 图 11-17)、圆锥形 (见图 11-18) 和漏斗形 (见图 11-19 ~ 图 11-21), 每种形状试样的试验部分都应是圆形横截面。

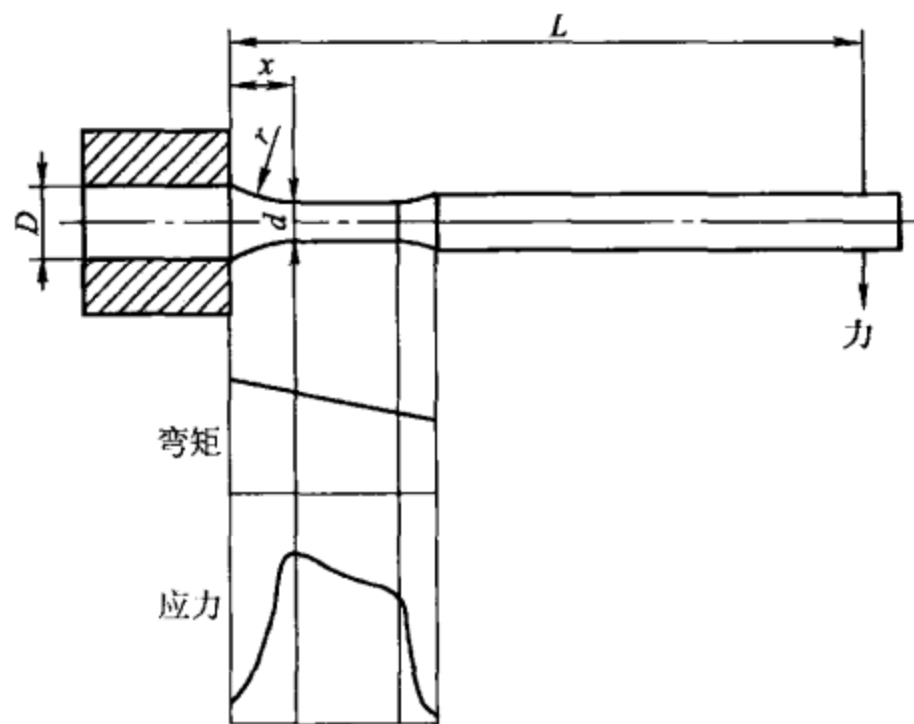


图 11-15 圆柱形试样（单点加力）

$D$ —试样夹持端直径 (mm)  $L$ —力臂 (mm)  $x$ —最大应力处的力臂 (mm)  
 $d$ —试样应力最大处直径 (mm)  $r$ —试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径 (mm)

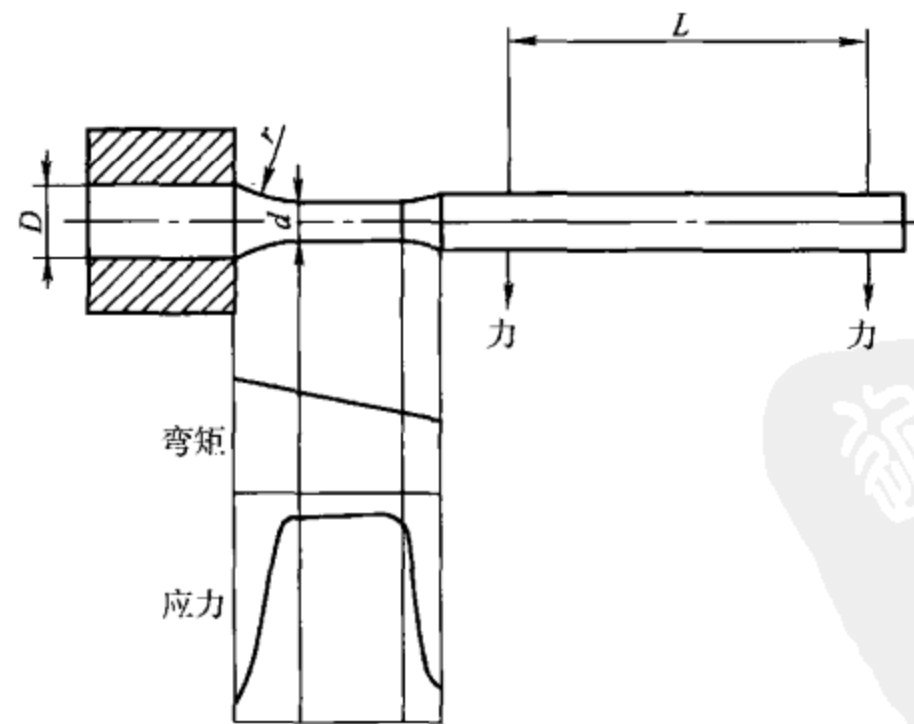


图 11-16 圆柱形试样（两点加力）

$D$ —试样夹持端直径 (mm)  $L$ —力臂 (mm)  $d$ —试样应力最大处直径 (mm)  
 $r$ —试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径 (mm)

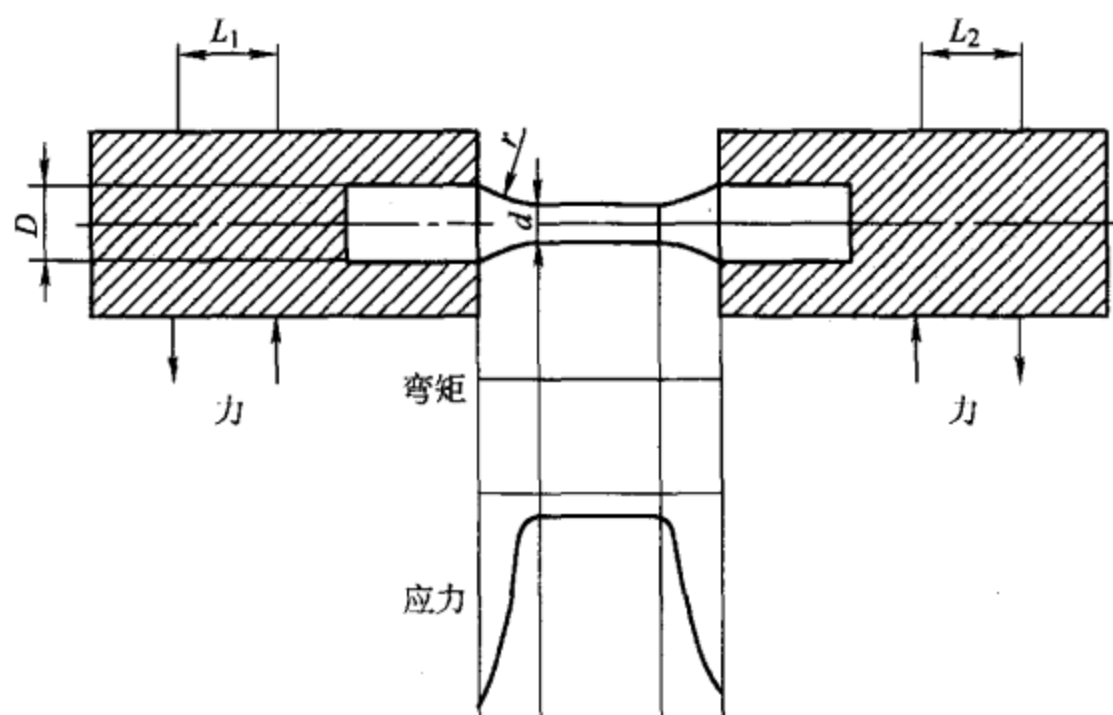


图 11-17 圆柱形试样（四点加力）

$D$ —试样夹持端直径（mm）  $L_1$ 、 $L_2$ —力臂（mm）  $d$ —试样应力最大处直径（mm）

$r$ —试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径（mm）

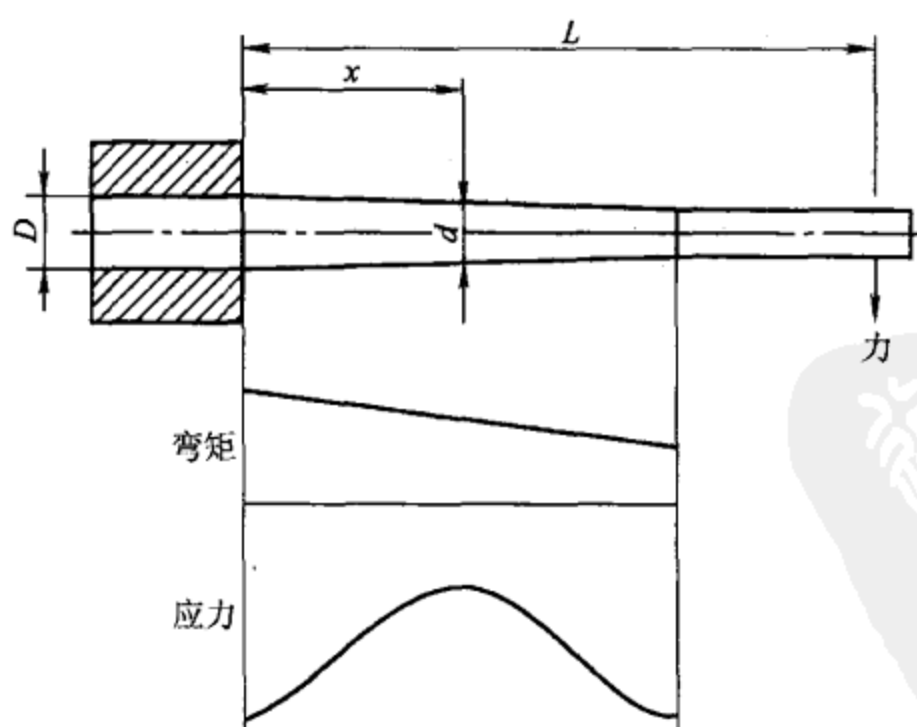


图 11-18 圆锥形试样（单点加力）

$D$ —试样夹持端直径（mm）  $L$ —力臂（mm）  $d$ —试样应力最大处直径（mm）

$x$ —最大应力处的力臂（mm）

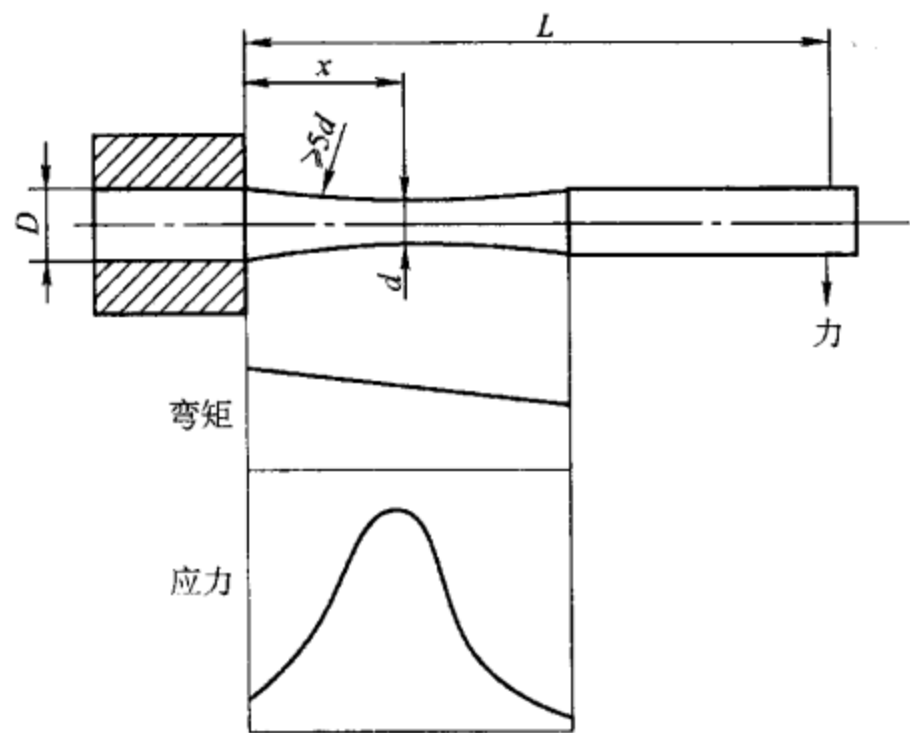


图 11-19 漏斗形试样（单点加力）

$D$ —试样夹持端直径 (mm)  $L$ —力臂 (mm)  $d$ —试样应力最大处直径 (mm)  
 $x$ —最大应力处的力臂 (mm)

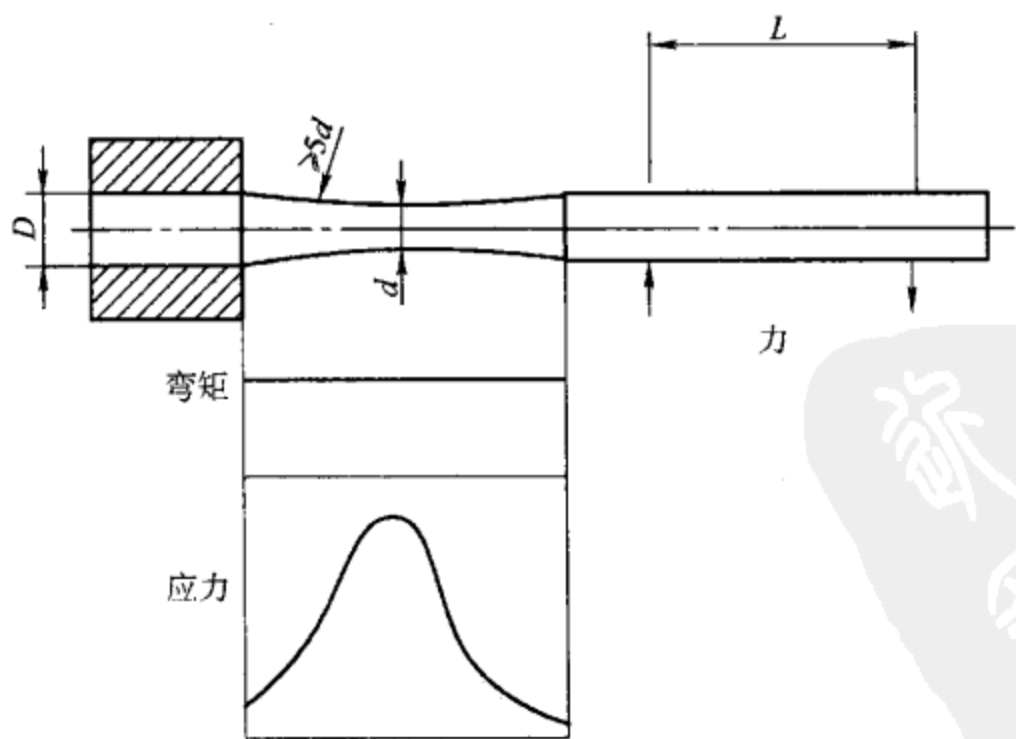


图 11-20 漏斗形试样（两点加力）

$D$ —试样夹持端直径 (mm)  $L$ —力臂 (mm)  $d$ —试样应力最大处直径 (mm)



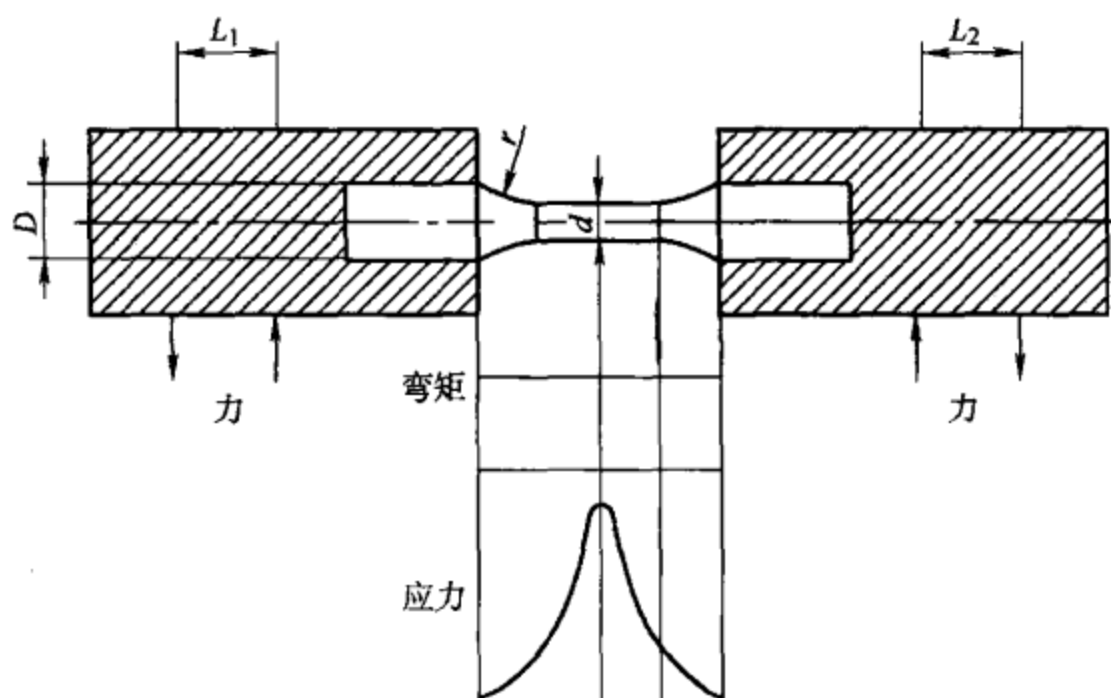


图 11-21 漏斗形试样（四点加力）

$D$ —试样夹持端直径 (mm)  $L_1$ 、 $L_2$ —力臂 (mm)  $d$ —试样应力最大处直径 (mm)

$r$ —试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径 (mm)

2) 试验部分的形状应根据所用试验机的加力方式设计。对于圆柱形或漏斗形试样可以采用简支梁或悬臂梁一点或两点加力，圆锥形试样只能采用悬臂梁单点加力方式。图 11-15 ~ 图 11-21 为各种方式的原理图，显示了各种情况下的弯矩和名义应力图。

3) 不同类型的试样给出的疲劳试验结果可能不同。一般采用使尽可能多的材料体积承受高应力的试样类型。

4) 对于某些材料高应力和高速旋转可能会引起试样发热。如果出现这种情况，应减小试样承受高应力的材料体积。如果采用冷却试样的方式，冷却介质不得与试验材料发生反应。应选取与试样发生最小反应的介质，试验介质应在报告中注明。

## 2. 试样尺寸

1) 同一批疲劳试验所使用的试样应具有相同的直径、形状和尺寸公差。

2) 为了准确计算施加的力，每支试样实际最小直径的测量应精确至 0.01mm。试验前测量试样尺寸时应确保不损伤试样表面。

3) 对于承受恒定弯曲的圆柱形试样，试验部分的平行度误差应保证在 0.025mm 以内，对于其他形状的圆柱形试样，试验部分的平行度误差应保证在 0.05mm 以内。试样夹持部分与试验部分的过渡圆弧半径应不小于  $3d$ 。对于漏斗形试样，试验部分的圆弧半径应不小于  $5d$ 。

4) 图 11-22 所示为圆柱形光滑试样的形状和尺寸。一般直径  $d$  为 6mm、

7.5mm 和 9.5mm。直径  $d$  的偏差为  $\pm 0.05\text{mm}$ 。图 11-23 所示为高温疲劳试验圆弧形光滑试样。

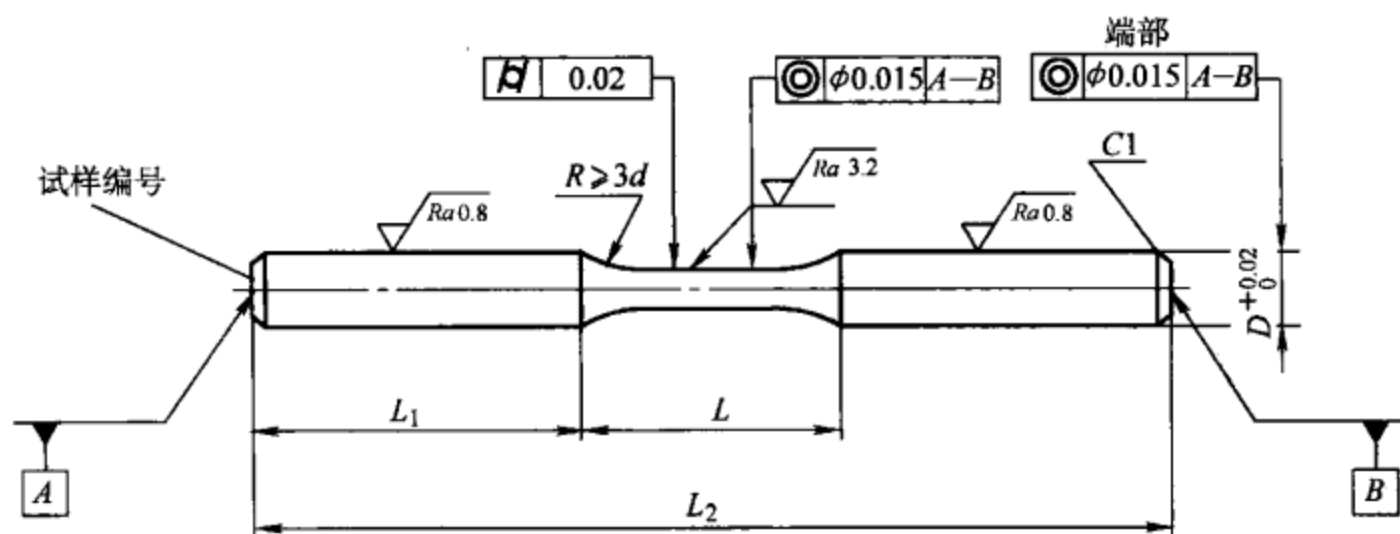


图 11-22 圆柱形光滑试样

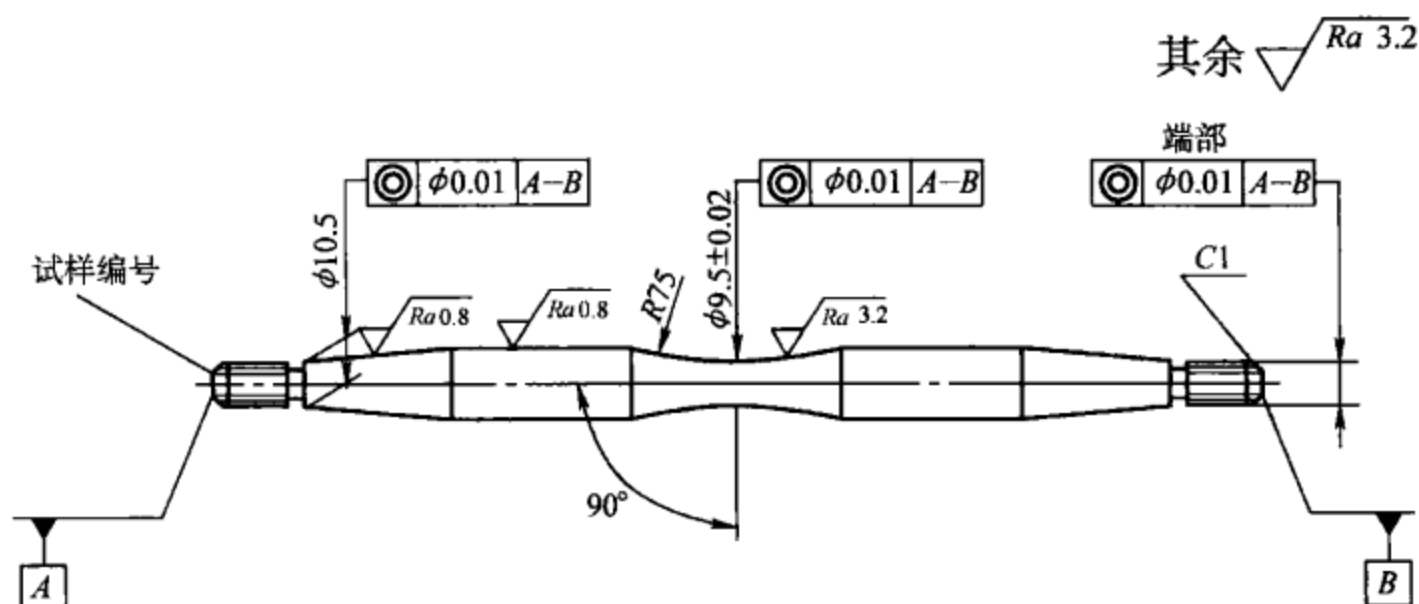


图 11-23 圆弧形光滑试样

5) 最小横截面直径  $d$  一般为 6mm、7.5mm 和 9.5mm。直径的偏差应不大于  $0.005d$ 。

6) 对于螺纹夹持的试样，螺纹部分的横截面积与试验部分的横截面积之比应不小于 3。

### 3. 取样和标记

1) 从半成品或零件上取样对试验结果会有影响，因此要在完全了解情况的条件下取样。

2) 取样图应附加到试验报告中，应清晰地表明每支试样的位置、半成品产品加工的特征方向（轧制方向、挤压方向等）、每件试样的标识。

3) 试样在加工的每个阶段都应有标识，应采取可靠的方法保证加工过程中标识不会消失或影响试验的结果。

#### 4. 加工过程

1) 机械加工可能在试样表面产生残余应力, 这些残余应力可能是机加工阶段的热梯度或材料变形或显微结构的变化引起的。在高温疲劳试验时不需考虑残余应力的影响, 这是因为残余应力在试样保温过程中已全部或部分释放。因此, 应该采取合适的机加工方式来减小残余应力, 尤其是在最终抛光阶段。

2) 对于较硬的材料, 选取磨削和抛光加工工艺最好。试样磨削前的加工余量为  $+0.1\text{mm}$ , 以不超过  $0.005\text{mm/r}$  的磨削速度进行磨削。抛光是用颗粒逐渐减小的不同砂纸去除掉最后的  $0.025\text{mm}$  加工余量。最终的抛光方向应沿着试样轴线。

3) 有些材料由于某些元素或化合物的存在而影响力学性能, 典型的例子就是氯离子对钢和钛合金的影响。在切削过程中应避免这些元素, 应在试样保存之前清洗和脱脂。

#### 5. 表面状态

1) 试样的表面状态对试验结果有影响, 这种影响通常与多种因素有关, 包括试样表面粗糙度、表面残余应力的存在、材料显微结构的改变、污染物的引入等。

2) 表面状态用平均表面粗糙度或当量值来定量化。在各种试验条件下, 试样的平均表面粗糙度  $Ra$  应小于  $0.2\mu\text{m}$ 。

3) 试样的最终加工要去除所有车削过程中的环向划痕, 最终的磨削应是纵向机械抛光。用大约 20 倍的光学仪器检查试样表面, 不允许有环向划痕。

4) 如果在粗加工之后进行热处理, 应在热处理之后进行最终的抛光。如果不可能再进行最终的抛光, 应在真空或惰性气体下进行热处理, 以防止试样的氧化。这种情况下残余应力已得到了释放。热处理的细节和机加工过程应在试验结果中注明。

### 11.4.4 试验设备及试验条件

#### 1. 旋转弯曲疲劳试验机

图 11-24 所示为主要类型旋转弯曲疲劳机的试验原理。

1) 可使用不同类型的旋转弯曲疲劳试验机, 但所施弯矩误差应在  $\pm 1\%$  以内, 选择的频率应适合于材料、试样和试验机的组合。对于给定的试验系列, 试验频率应当相同。试验过程中应避免试样振动。

2) 试验频率通常为  $15 \sim 200\text{Hz}$  (对应的转速为  $900 \sim 10000\text{r/min}$ ), 并连续可调。

3) 高速旋转下的试样可能会产生自热, 对疲劳寿命和强度的试验结果产生影响。如果发生此类情况, 应降低试验频率。试样温度不应超过试验材料熔点的  $30\%$ , 并应记录相应温度。

4) 如果环境的影响很明显, 试验结果可能具有频率依赖性。

## 2. 加温装置和温度测量装置

- 1) 试样用电阻炉等加热装置加热。
- 2) 炉温应保持均匀, 试样工作部分应完全处于炉膛内, 温度梯度不大于  $15^{\circ}\text{C}$ 。
- 3) 测量或记录温度所用的热电偶、补偿导线和控温、测温仪表都应定期进行标定。
- 4) 温度显示器的分辨力至少为  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 温度测量装置的误差应在  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  以内。

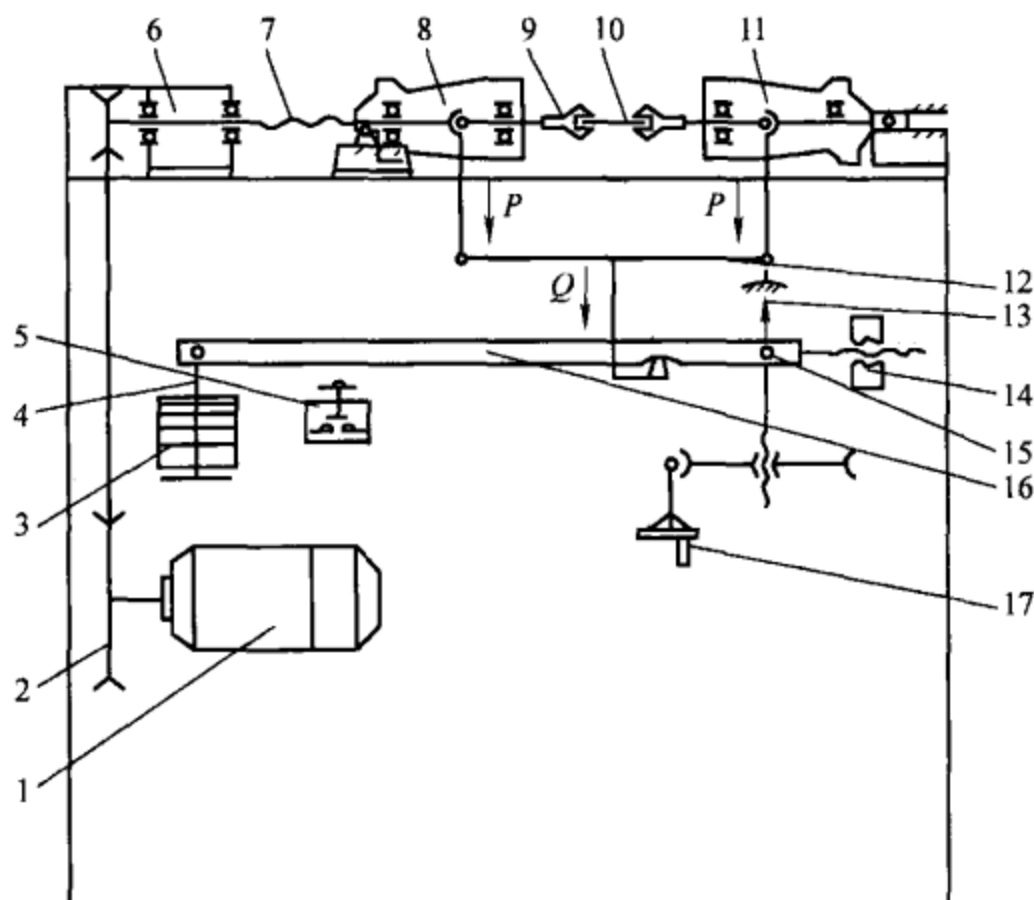


图 11-24 旋转弯曲疲劳试验机的原理图

- 1—电动机 2—三角带 3—砝码 4—吊杆 5—按钮 6—计数减速器  
 7—软轴 8—左主轴箱 9—弹簧夹头 10—试样 11—右主轴箱  
 12—吊钩 13—指针 14—平衡锤 15—计数器  
 16—标杆 17—手轮

### 11.4.5 试验步骤

#### 1. 安装试样

1) 安装每支试样时, 要避免试验部分承受施加力以外的应力。如果轴承是通过开口销来传递力的, 在这种情况下就要求将试样定位好并拧紧, 避免起始扭应变的产生。

2) 为了避免试验过程中的振动, 试样的同轴度和试验机的驱动轴应保持在接近的极限值之内。主轴端的最大允许误差为  $\pm 0.025\text{mm}$ 。对于单点或两点加载悬臂试验机, 自由端的最大允许误差为  $\pm 0.013\text{mm}$ 。对于其他类型的旋转弯曲疲劳试验机, 实际工作部分两端的径向误差应不大于  $\pm 0.013\text{mm}$ 。

## 2. 终止试验

试验一直进行到试样失效或达规定循环次数时终止。如果失效位置发生在试样标距以外, 则试验结果无效。

## 3. 高温试验步骤

1) 当试样用辐射炉加热时, 需要控制转动时的试样温度。在疲劳试验中, 不能使用直接温度测量方法。允许用间接温度测量方法在静态下标定试验温度。

2) 试样加热至规定的试验温度, 保温 0.5h。测量试验温度时, 可采用间接测量 (即热电偶的热端不直接接触试样工作表面, 而与其相距 1 ~ 2mm) 与直接测量法 (即热电偶热端直接接触试样工作表面, 此测量必须在试验机停止转动的状态下进行)。间接测量温度的方法用于控制试样温度。

3) 在试验过程中, 控制炉温的波动范围如表 11-2 所示。

表 11-2 炉温允许的波动范围

(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

试验温度	温度波动
$\leq 600$	$\pm 3$
$> 600 \sim 900$	$\pm 4$
$> 900 \sim 1200$	$\pm 5$

4) 温度测量装置在室温发生变化时, 温度波动应稳定在  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

5) 在试验过程中, 若短时间内炉温有降低现象, 应将炉温降低期间内的循环次数从总循环数中减去。

## 4. S-N (应力-寿命) 曲线的构成

某些材料的 S-N 曲线在给定的循环数显示明显的斜率变化, 如曲线的后半段平行于水平轴线。也有一些材料 S-N 曲线呈现连续的曲线, 最终趋近于水平轴。对于第一种类型的 S-N 曲线, 推荐取  $10^7$  耐久寿命; 对于第二种类型, 取  $10^8$  耐久寿命。特定的循环数应包括在测定的耐久极限应力范围内。

## 11.4.6 试验结果的处理

### 1. 表格的表达形式

当采用表格的报告格式时, 表格内容应包括试样标识、试验顺序、试验应力范围、疲劳寿命或试验结束时的循环数等。

### 2. 图形表达形式

最普遍的疲劳试验数据的图形表达形式是 S-N 曲线, 如图 11-25 所示。以横坐标表示疲劳寿命  $N_f$ , 以纵坐标表示最大应力  $S_{\max}$ 。应力范围或应力幅, 一般使用线性尺度, 也可用对数尺度。用直线或曲线拟合各数据点, 即得 S-N 曲线图。

S-N 曲线图上至少应包括材料牌号、材料的级别及拉伸性能、试样的表面状

态、缺口试样的应力集中系数、疲劳试验的类型、试验频率、环境和试验温度等。

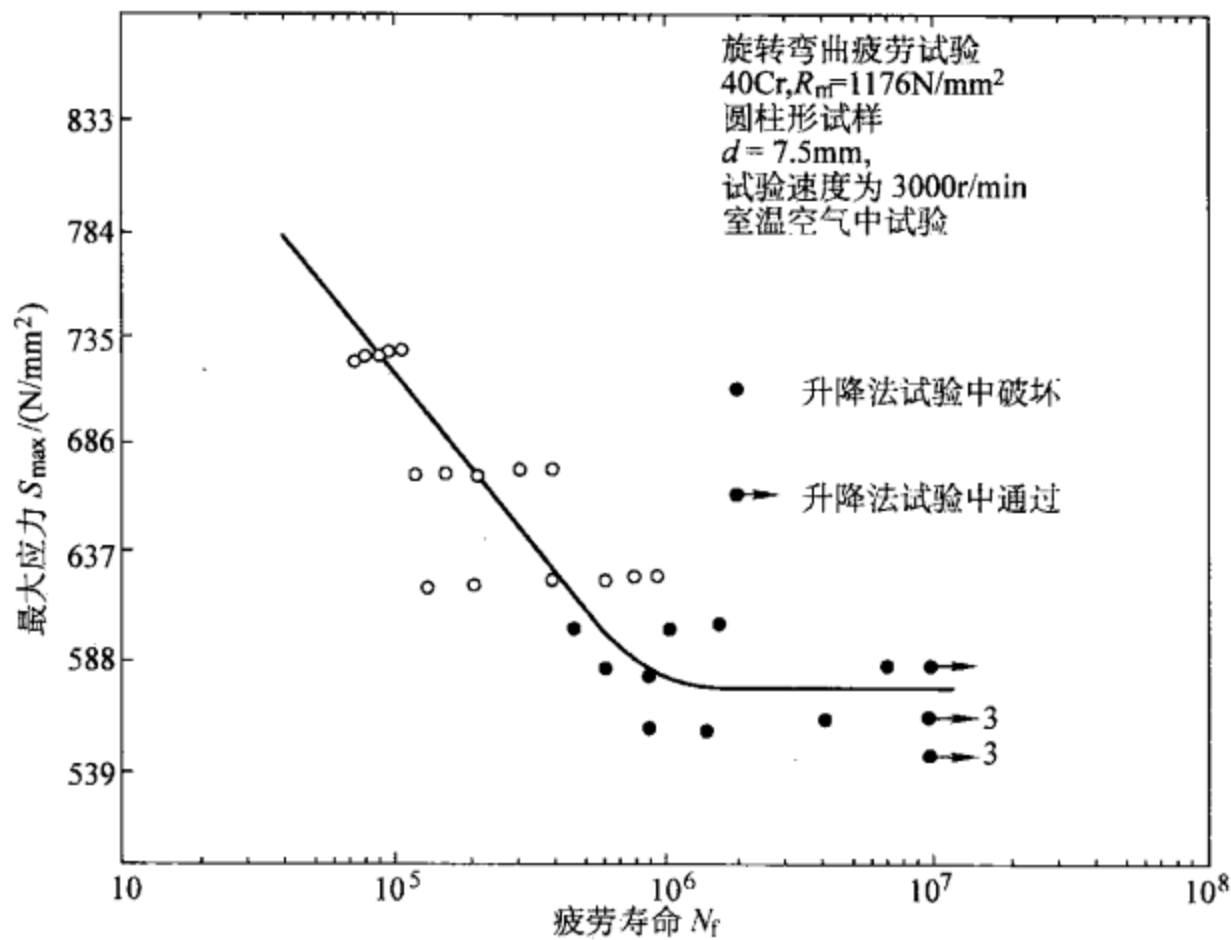


图 11-25 S-N 曲线图

11.5 疲劳裂纹扩展速率试验

11.5.1 试验术语

(1) 循环 力或应力随时间作周期性变化的一个完整过程，通常称为力循环或应力循环。

(2) 循环数 ( $N$ ) 力循环的次数。

(3) 疲劳裂纹扩展速率 力循环一次的疲劳裂纹扩展量，一般表示为裂纹尖端应力强度因子范围  $\Delta K$  的函数。

(4) 应力强度因子 ( $K$ ) 裂纹尖端附近区域弹性应力场强度的量值，一般指 I 型受力情况。

(5) 应力强度因子  $K$  标定 在特定试样平面几何条件下应力强度因子与力和裂纹长度的关系，它是基于试验和解析的数字表达式或曲线。

(6) 计算裂纹长度  $a$  与实际裂纹相当的直前缘裂纹长度。对于 C (T) 试样， $a$  从加力线开始计量，如图 11-26 所示。对于 M (T) 试样， $a$  从试样中心线开始计量，如图 11-27 所示。对于 SE (B) 试样， $a$  从试样边缘开始计量，如图 11-28 所示。



- (7) 最大力 ( $F_{\max}$ ) 循环力的最大代数值。
- (8) 最小力 ( $F_{\min}$ ) 循环力的最小代数值。
- (9) 力值范围 ( $\Delta F$ ) 最大与最小力之差。
- (10) 力值比 ( $R$ ) 最小力与最大力之比。
- (11) 最大应力强度因子 ( $K_{\max}$ ) 对应于最大力的应力强度因子, 并随裂纹长度的增长而变化。

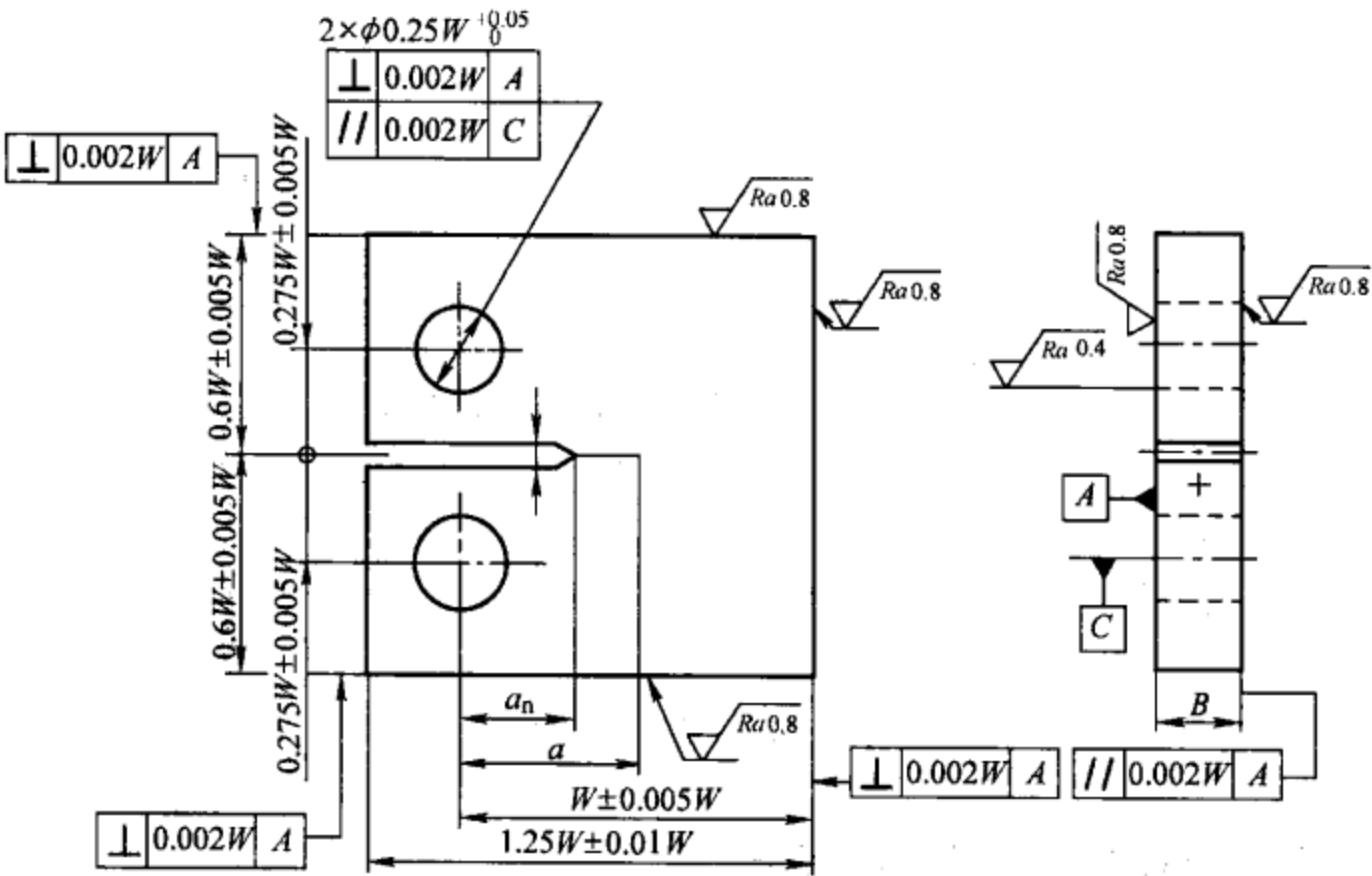


图 11-26 标准 C (T) 试样图

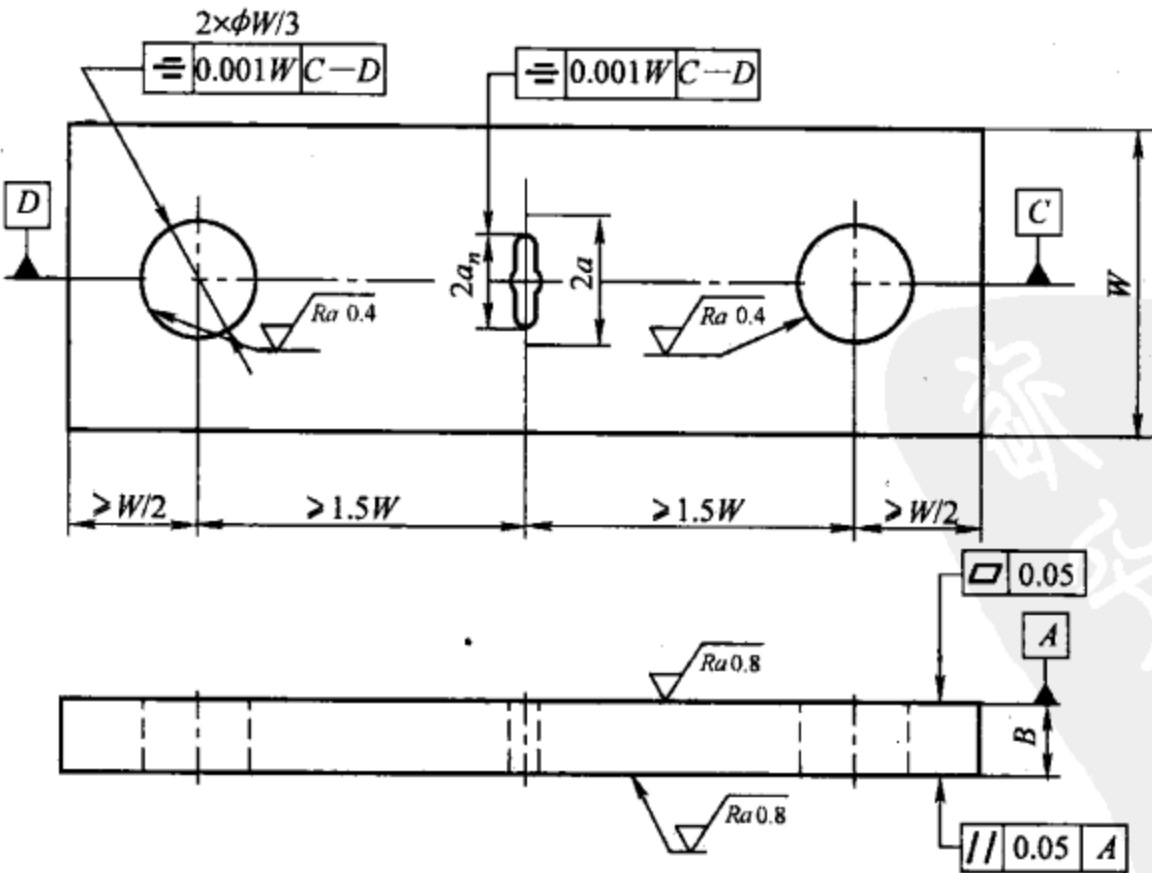


图 11-27  $W \leq 75\text{mm}$  的 M (T) 试样图



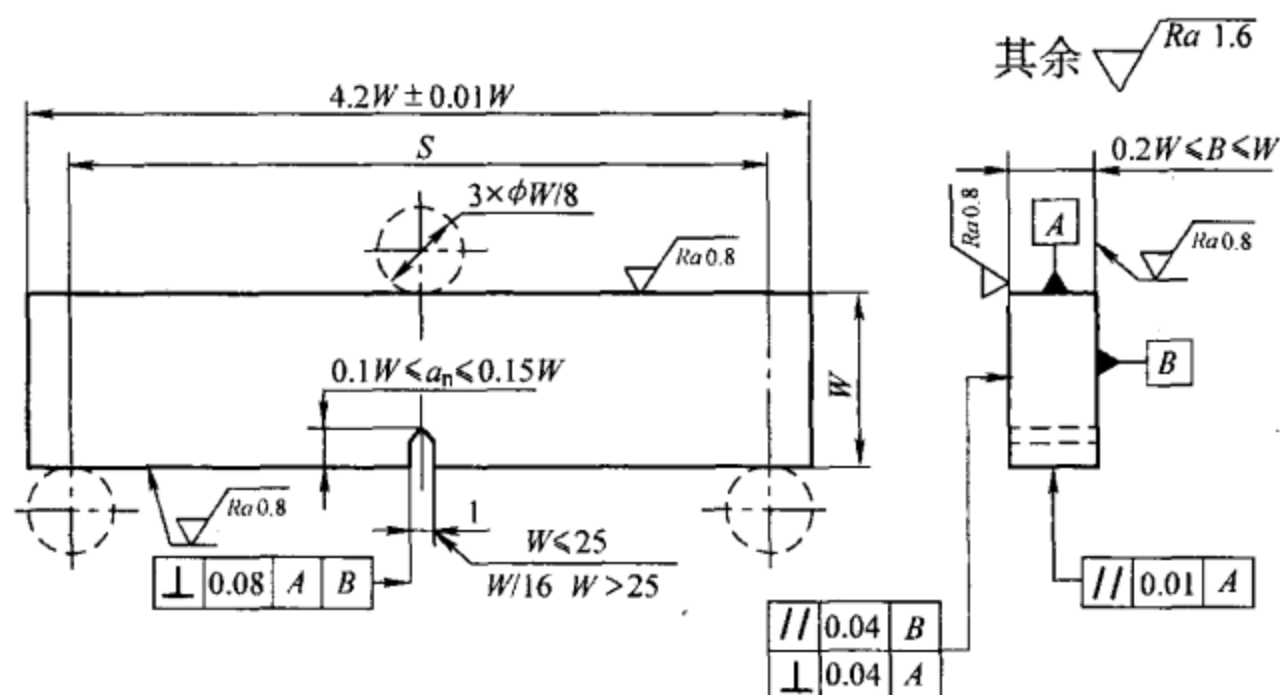


图 11-28 标准 SE (B) 试样

(12) 最小应力强度因子 ( $K_{\min}$ ) 当力值比  $R$  大于或等于零时, 对应于最小力的应力强度因子; 当力值比  $R$  小于零时, 取为零。

(13) 应力强度因子范围 ( $\Delta K$ ) 最大与最小应力强度因子值之差。

(14) 疲劳裂纹扩展门槛值 ( $\Delta K_{th}$ ) 在应力强度因子  $K$  随裂纹长度增加而降低的试验中, 疲劳裂纹扩展速率接近于零或裂纹停止扩展时所对应的裂纹尖端应力强度因子范围。通常定义疲劳裂纹扩展速率等于  $10^{-7}$  mm/周所对应的应力强度因子范围值为  $\Delta K_{th}$ 。

(15) 规范化的  $K$  梯度  $K$  随裂纹长度增加而变化的相对速率。

## 11.5.2 试样

### 1. 试样形状

1) 标准 C (T) 试样如图 11-26 所示。

2) 标准 M (T) 试样如图 11-27 所示, 试样工作长度应满足如下要求:

①对于拉-拉加力: 试样宽度  $W$  不大于 75mm 时, 采用单销加力, 加力孔之间的距离应不小于  $3W$ 。特殊几何形状 M (T) 试样的  $W$  大于 75mm 时, 采用多排螺栓夹紧, 试样两端最里面一排螺钉孔之间的距离应不小于  $1.7W$ 。

②对于拉-压加力: 采用夹板夹紧, 夹板内边缘之间的距离  $L$  应大于或等于  $1.2W$ 。

3) 标准 SE (B) 试样如图 11-28 所示, 跨距  $S$  取  $4W$ 。

### 2. 试样厚度 (B)

1) 对于 C (T) 试样, 推荐试样厚度的范围应满足  $W/20 \leq B \leq W/4$ ,  $W$  不小于 25mm。

2) 对于 M (T) 试样, 推荐的试样厚度上限为  $W/8$ , 所必要的最小厚度要能避免弯曲, 并保证弯曲应变不超过名义应变的 5%。

3) 对于 SE (B) 试样, 推荐试样厚度的范围为  $W/5 \leq B \leq W$ 。

### 3. 试样宽度 (W)

1) 为测得有效的试验数据, 选择试样的最小宽度  $W$ 。主要根据有: 材料的规定非比例伸长应力  $R_{P0.2}$ 、预期的最大应力强度因子的极限值  $K_{maxL}$ 、C (T) 试样的比值  $a/W$  或 M (T) 试样的比值  $2a/W$  的极限值。试样尺寸标准化曲线如图 11-29 所示。

2) 如果是 C (T) 试样, 根据对无裂纹韧带最小值的要求按下式绘制图 11-29 中的曲线。

$$W - a = \frac{4}{\pi} \left( \frac{K_{max}}{\sigma_{P0.2}} \right)^2$$

式中  $W - a$ ——试样无裂纹的韧带区, 单位 mm;

$K_{max}$ ——最大应力强度因子, 单位为  $N/mm^{3/2}$ ;

$\sigma_{P0.2}$ ——规定非比例伸长应力, 单位为  $N/mm^2$ 。

3) 如果是 M (T) 试样, 根据对无裂纹韧带最小值的要求按下式绘制图 11-29 中的曲线。

$$W - 2a = \frac{1.25 F_{max}}{B \sigma_{P0.2}}$$

式中  $W - 2a$ ——试样无裂纹的韧带区, 单位为 mm;

$F_{max}$ ——最大力, 单位为 N;

$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$\sigma_{P0.2}$ ——规定非比例伸长应力, 单位为  $N/mm^2$ 。

4) 对于 SE (B) 试样的最小宽度  $W$  的选择, 可根据规定非比例伸长应力  $\sigma_{P0.2}$ 、预期的最大应力强度因子的极限值  $K_{maxL}$  和比值  $a/W$  的极限值获得。无裂纹韧带最小值按下式计算:

$$W - a = \left( \frac{12 W F_{max}}{2 B \sigma_{P0.2}} \right)^{1/2}$$

式中  $W - a$ ——试样无裂纹的韧带区, 单位为 mm;

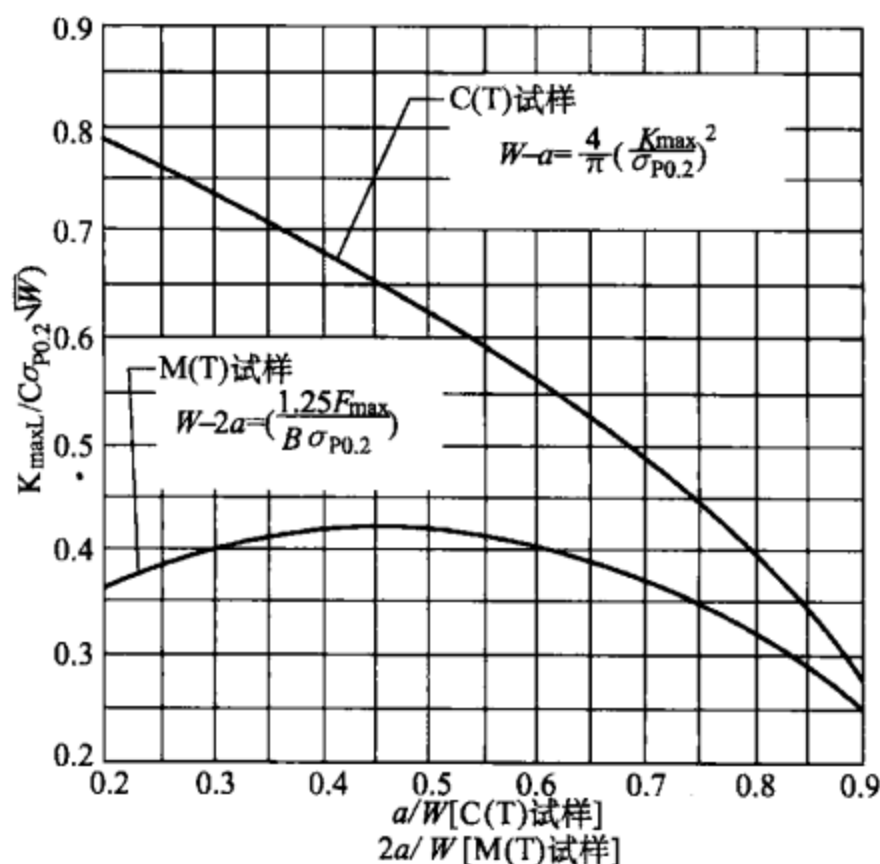


图 11-29 C (T) 和 M (T) 标准试样尺寸  
标准化曲线图

$F_{\max}$ ——最大力，单位为 N；

$B$ ——试样厚度，单位为 mm；

$\sigma_{P0.2}$ ——规定非比例伸长应力，单位为  $\text{N/mm}^2$ 。

#### 4. 切口长度

1) C (T) 试样的切口长度  $a_1$  应不小于  $0.2W$ 。

2) M (T) 试样的切口长度  $a_n$  应不小于中心孔半径的三倍。当采用柔度法测量裂纹长度时，一般中心裂纹长度  $2a_n$  不小于  $0.2W$ 。

3) SE (B) 试样的切口长度  $a_n$  应符合  $0.1W \leq a_n \leq 0.15W$ 。

#### 5. 切口制备

试样切口可通过铣削、线切割和其他方法加工而成。图 11-30 给出了各种不同的切口几何形状。为了便于预制出合格的疲劳裂纹，应在热处理后进行线切割加工，切口根部曲率半径  $\rho$  不大于  $0.08\text{mm}$ （在预制出合格的疲劳裂纹的前提下曲率半径  $\rho$  可以稍大些）；铣削加工的人字形切口及其他加工的切口形状其根部曲率半径  $\rho$  不大于  $0.25\text{mm}$ 。

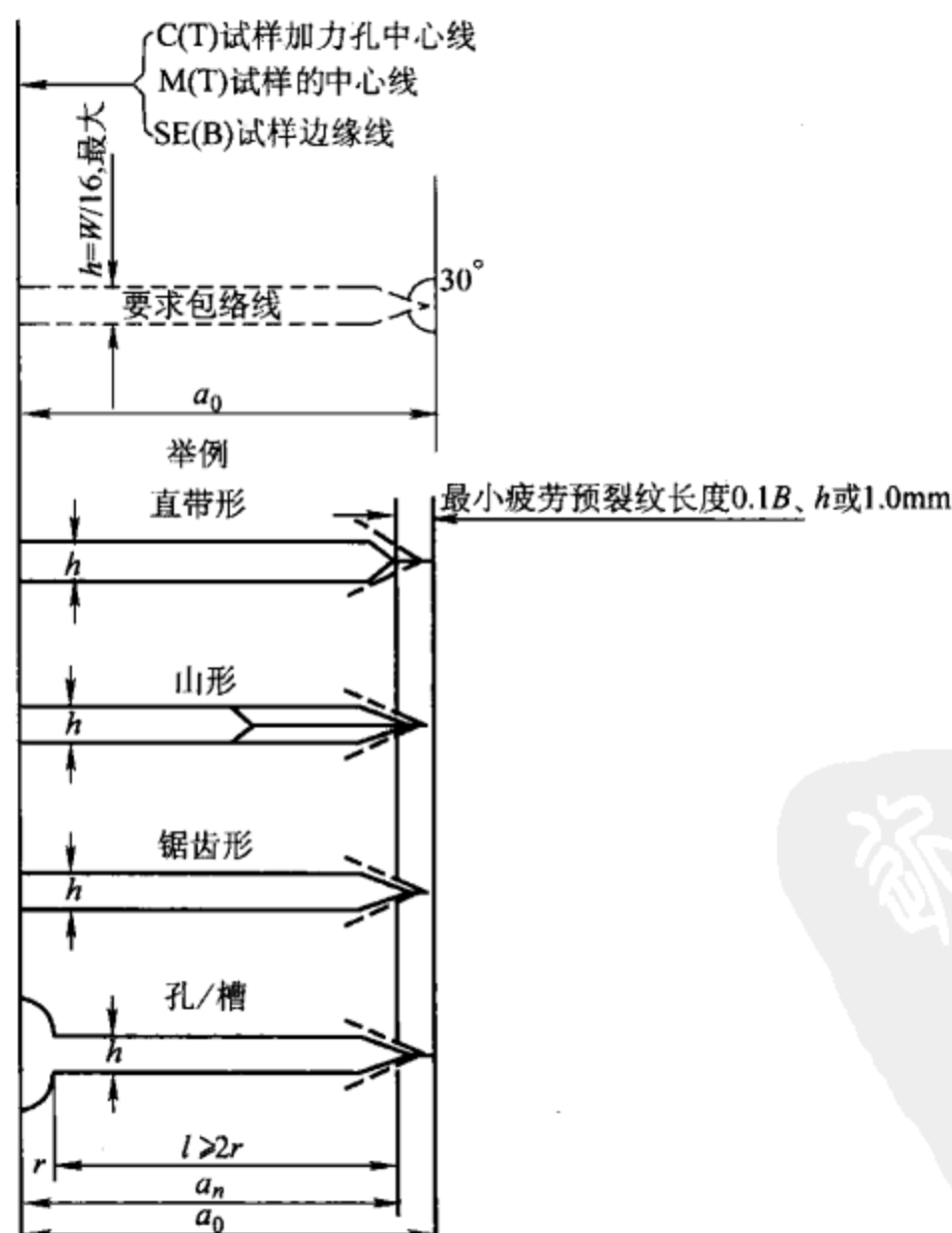


图 11-30 切口详图及最小疲劳预裂纹长度的要求

$a_n$ ——试样切口长度 (mm)

## 6. 试样数量

- 1) 测定应力/应变-寿命曲线时, 一般需 12 ~ 15 根试样, 选取几级应力或应变水平分别测定其失效循环数。
- 2) 在规定的应力或应变值下测定其失效的循环数时, 一般不少于 3 根试样。

## 11.5.3 试验设备及试验条件

### 1. 疲劳试验机

试验允许在不同类型的拉压疲劳试验机上进行, 加力系统应有良好的同轴度, 使试样受力对称分布。按照 GB/T 16825.2—2005《静力单轴试验机的检验 第2部分: 拉力蠕变试验机 施加力的检验》在静态下检验力值, 最大允许误差为  $\pm 1\%$ , 示值变动度不超过 1%; 按照 JJG 556—1988《轴向加荷疲劳试验机》在动态下检验力值, 最大允许误差为  $\pm 3\%$ 。疲劳试验机应带有准确的循环计数装置。

### 2. 加力装置

- 1) C (T) 试样的加力装置为 U 形夹具, 按图 11-31 设计。材料的规定非比例伸长应力应大于  $980.7 \text{ N/mm}^2$ 。销钉与销孔间隙应设计得使摩擦减至最小。

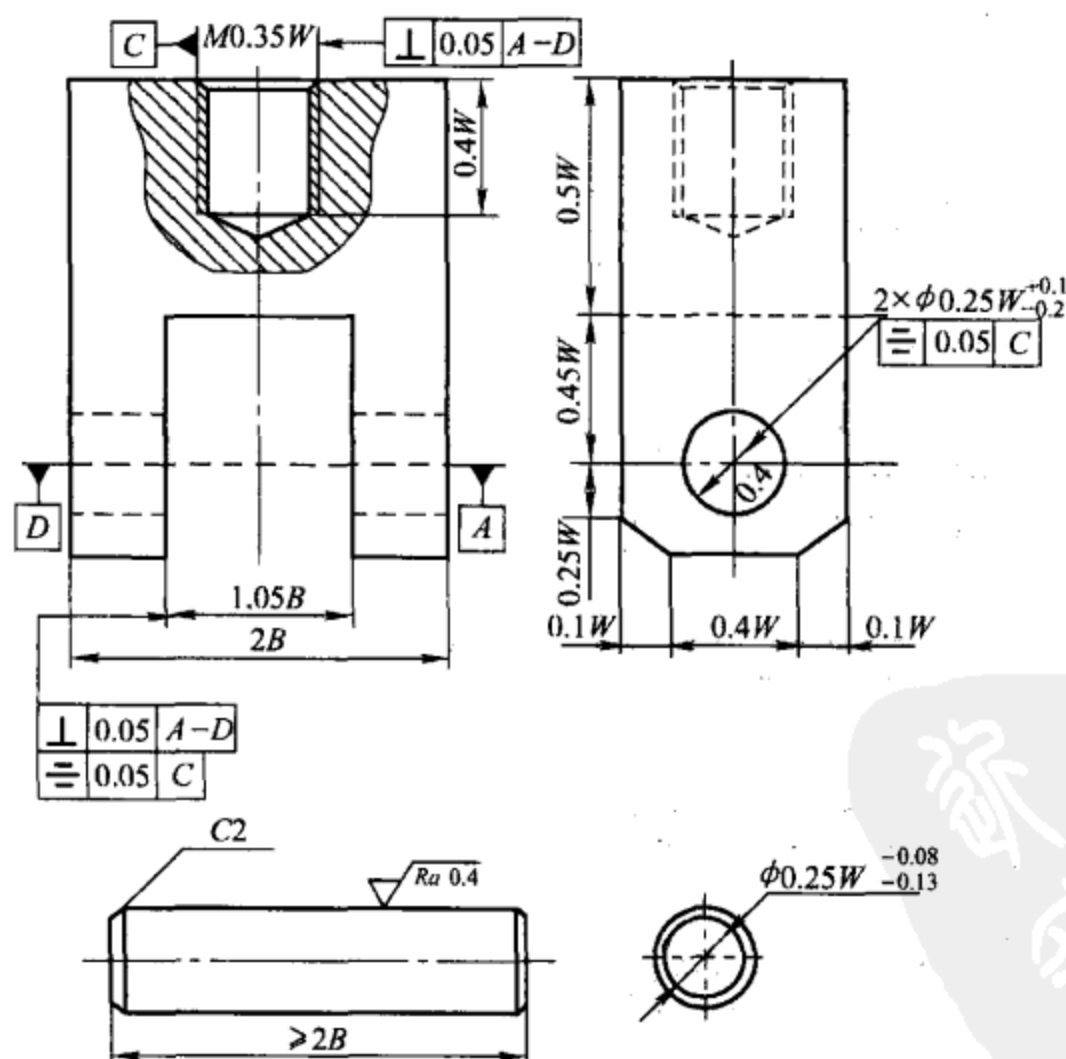


图 11-31 C (T) 试样 U 形夹具和销钉图

- 2) M (T) 试样的加力夹具设计应保证在整个试验过程中试样工作区域内应力均匀分布。为限制屈曲, 薄板试验必须采用约束导板。夹具夹紧形式随试样宽度

和加力条件的变化而变化。对于拉-拉加力,宽度  $W$  不大于 75mm 时,可采用单销夹紧或平板液压夹具夹紧;宽度  $W$  大于 75mm 时,采用多排螺栓夹紧或平板液压夹具夹紧。对于拉-压加力,采用压板夹紧,夹紧力也可由液压和机械楔形系统提供。

3) SE (B) 试样的三点弯曲加力线和支承线的圆柱直径取  $W/8$ ,跨距  $S$  取  $4W$ ,圆柱与试样的接触应设计得使摩擦减至最小。

#### 11.5.4 试验步骤

##### 1. 试样尺寸测量

1) 用最小分度值不大于 0.01mm 的量具,在试样的韧带区域三点处测量厚度  $B$ ,取算术平均值。

2) 用最小分度值不大于 0.001 $W$  的量具,在试样的裂纹所在截面附近测量宽度  $W$ 。

##### 2. 预制疲劳裂纹

(1) 加力 预制疲劳裂纹的加力要求如下:

1) 预制疲劳裂纹时应使最大力  $F_{\max}$  的误差控制在  $\pm 5\%$  以内。

2) 预制疲劳裂纹最后一级的最大力值不超过开始记录试验数据时的最大力值。

3) 为减少预制疲劳裂纹所用时间,可以先用比试验最大力值较高的力产生疲劳裂纹,但必须把较高的力分级降到试验最大力值,每级下降率不大于 20%。

(2) 长度 预制疲劳裂纹长度的要求如下:

1) 在前后表面上从切口顶端到疲劳裂纹尖端测量裂纹长度,准确到  $\pm 0.1\text{mm}$  或  $\pm 0.002W$  中较大者,所测各个裂纹长度均应大于  $0.1B$  和切口宽度  $h$ ,但不得小于 1mm ( $W > 127\text{mm}$  的试样,测量裂纹长度准确到 0.25mm 以内)。

2) 若前后表面裂纹长度测量值之差超过  $0.25B$ ,或左右两侧裂纹长度测量值之差(取前后表面的算术平均值)超过  $0.025W$ ,则预制裂纹无效。

##### 3. 疲劳裂纹扩展试验

1) 应保持力稳定,并避免力过载引起的迟滞效应。

2) 当存在环境影响时,必须考虑加力水平、频率和波形的影响。

3) 若长时间中断试验,而中断后的裂纹扩展速率比中断前小,则试验无效。

4) 若试验中任何一点平均穿透疲劳裂纹与试样对称平面的最大偏离超过  $\pm 10^\circ$ ,则此点数据无效。

5) 若在试验中某一点处前后表面裂纹长度测量值之差超过  $0.25B$ ,或左右两侧裂纹长度测量值之差(取前后表面的算术平均值)大于  $0.025W$ ,则此点数据无效。

6) 用目测法测量裂纹长度时, 应将裂纹长度  $a$  与循环数  $N$  的记录值随时标在坐标纸上。

#### 4. 裂纹长度测量

1) 用目测法或等效的方法测量疲劳裂纹长度, 测量准确到  $\pm 0.1\text{mm}$  或  $\pm 0.002W$  中较大者 ( $W > 127\text{mm}$  的试样, 测量裂纹长度应准确到  $0.25\text{mm}$  以内)。

2) 测量裂纹长度最好在不中断试验的情况下进行。若需中断试验测量时, 中断时间应减至最少。为增加裂纹尖端清晰度, 可加静力, 其值应小于最大试验力。

3) 裂纹增量  $\Delta a$  的测量间隔应使各数据点接近均匀分布。测量裂纹增量间隔如表 11-3 所示。

表 11-3 测量裂纹增量间隔

试样类型	测量范围	裂纹增量 $\Delta a \leq$
C(T) 试样和 SE(B) 试样	$0.25 \leq a/W \leq 0.40$	$0.04W$
	$0.40 < a/W \leq 0.60$	$0.02W$
	$a/W > 0.60$	$0.01W$
M(T) 试样	$2a/W \leq 0.60$	$0.03W$
	$2a/W > 0.60$	$0.02W$

5) 在任何情况下, 最小的  $\Delta a$  应不小于  $0.25\text{mm}$ 。

6) 用目测法测量裂纹长度时, 当比值  $B/W$  小于  $0.15$  时, 对于 C(T) 试样和 SE(B) 试样, 只需在一个表面上测量裂纹长度; 对于 M(T) 试样, 需在左右两侧测量裂纹长度, 取算术平均值。当比值  $B/W$  大于或等于  $0.15$  时, C(T) 试样和 SE(B) 试样需在前后两个表面上测量裂纹长度, 取算术平均值; 对于 M(T) 试样, 则需在前后表面的左右两侧测量四个裂纹长度, 取算术平均值。

### 11.5.5 试验结果的处理

#### 1. 裂纹曲率的修正

1) 试验结束之后检验断口, 以确定裂纹前缘曲率范围。若需要进行曲率修正且裂纹前缘线条明显, 则至少在两个位置 (如预制裂纹和极限裂纹) 测量沿厚度方向  $B/4$ 、 $B/2$ 、 $3B/4$  三点处的裂纹长度, 其算术平均值 (平均裂纹长度) 与试验记录的相应裂纹长度之差即为曲率修正量。

2) 在任何一个位置上, 若由断口测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子, 与由试验测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子相差大于  $5\%$ , 则需进行曲率修正。

3) 裂纹曲率修正量不是一个恒量, 当它随裂纹伸长而单调增加或减少时, 则



采用线性内插法修正中间各数据点。

## 2. 疲劳裂纹扩展速率的确定

采用拟合  $a-N$  (裂纹长度-循环数) 曲线求导的方法确定疲劳裂纹扩展速率, 可用割线法和递增多项式法进行, 参见 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》。

## 3. 应力强度因子范围的计算

1) 对于 C(T) 试样, 应力强度因子范围按下式计算:

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B \sqrt{W}} \times \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

式中  $\Delta K$ ——应力强度因子范围, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ;

$\Delta F$ ——力值范围, 单位为 N;

$B$ ——试样厚度, 单位为 mm;

$W$ ——试样宽度, 单位为 mm;

$\alpha$ —— $\alpha = a/W$ ;

$a$ ——计算裂纹长度, 单位为 mm。

2) 对于 M(T) 试样, 应力强度因子范围按下式计算:

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}}$$

式中  $\Delta F$ —— $\Delta F = F_{\max} - F_{\min}$  ( $R \geq 0$ );  $\Delta F = F_{\max}$  ( $R < 0$ );

$\alpha$ —— $\alpha = 2a/W$ 。

3) 对于 SE(B) 试样 (跨距取  $4W$ ), 应力强度因子范围按下式计算:

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{BW^{1/2}} \left[ \frac{6\alpha^{1/2}}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \right] [1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)]$$

式中  $\alpha$ —— $\alpha = a/W$ 。

# 11.6 轴向等辐低循环疲劳试验

## 11.6.1 试验术语

(1) 应力/应变-寿命曲线 一般是用一组试样, 选取若干个应力或应变值, 分别测定其到达失效的循环数, 然后绘出  $\Delta\sigma/2-2N_f$  或  $\Delta\varepsilon_t/2-2N_f$  曲线 ( $\Delta\sigma$  是循环应力范围, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $N_f$  是失效循环数, 单位为周;  $\varepsilon_t$  是总应变范围), 如图 11-32 和图 11-33 所示。根据关系式  $\Delta\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$  ( $\Delta\varepsilon_e$  是弹性应变范围,  $\Delta\varepsilon_p$  是塑性应变范围),  $\Delta\varepsilon_t/2-2N_f$  曲线还可处理成图 11-34 形式。



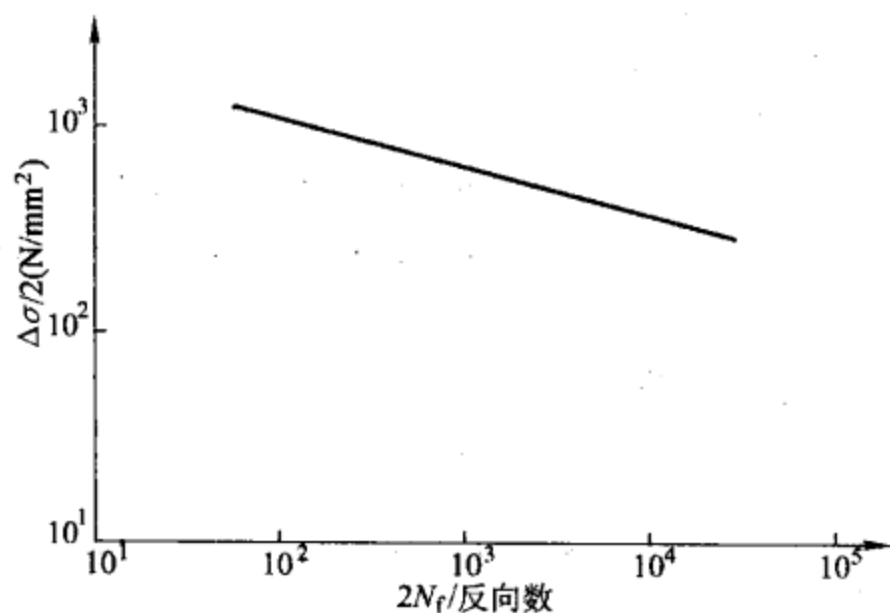


图 11-32  $\Delta\sigma/2-2N_f$  曲线

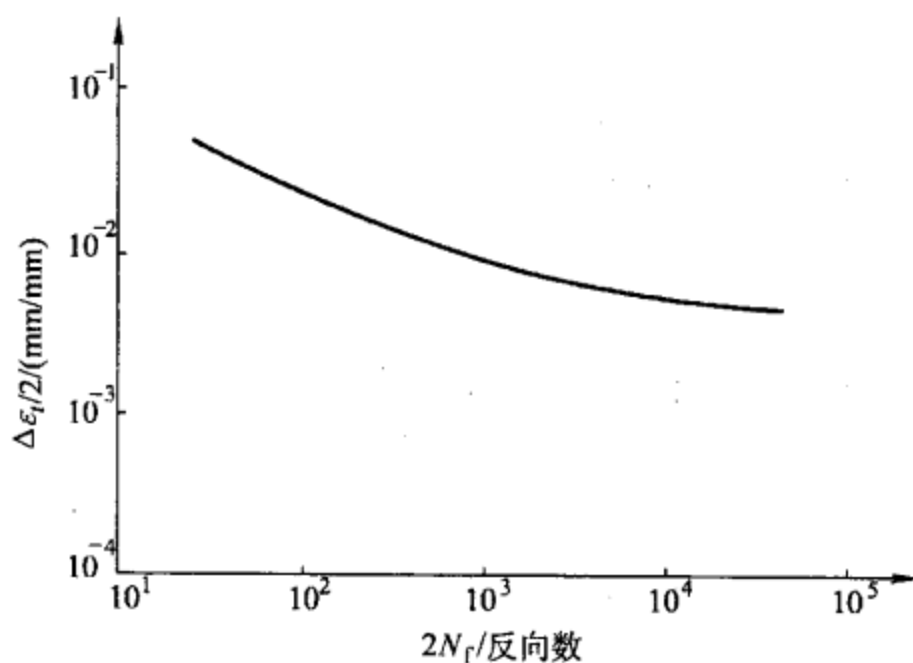


图 11-33  $\Delta\epsilon_t/2-2N_f$  曲线

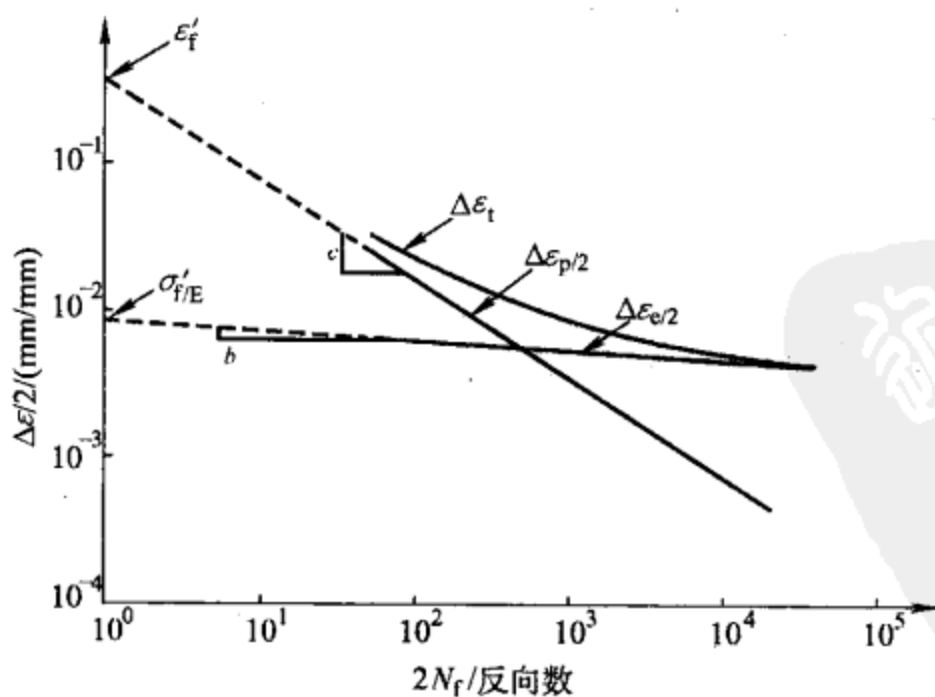


图 11-34  $\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$  状态  $\Delta\epsilon_t/2-2N_f$  曲线

$\epsilon'_f$ —疲劳延性系数  $\sigma'_f$ —疲劳强度系数

$E$ —弹性模量  $c$ —疲劳延性指数  $b$ —疲劳强度指数

(2) 应力-应变迟滞回线 一次循环中的应力-应变关系曲线, 如图 11-35 所示。

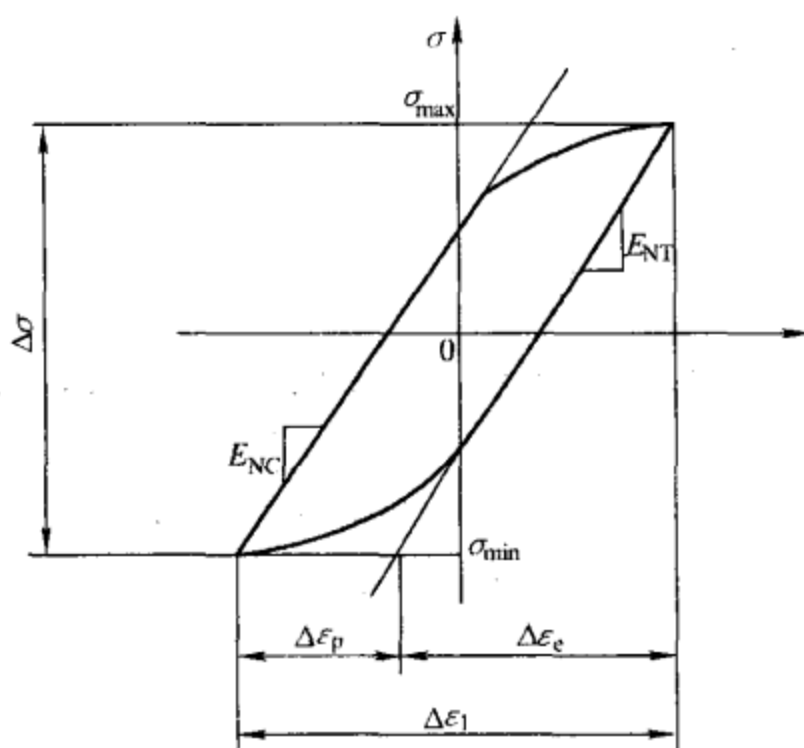


图 11-35 应力-应变迟滞回线

(3) 循环应力-应变曲线 在不同总应变范围下得到的一系列稳定迟滞回线顶点的轨迹, 如图 11-36 所示。也可用稳定应力幅和塑性应变幅在双对数坐标上绘出的关系曲线表示, 如图 11-37 所示。

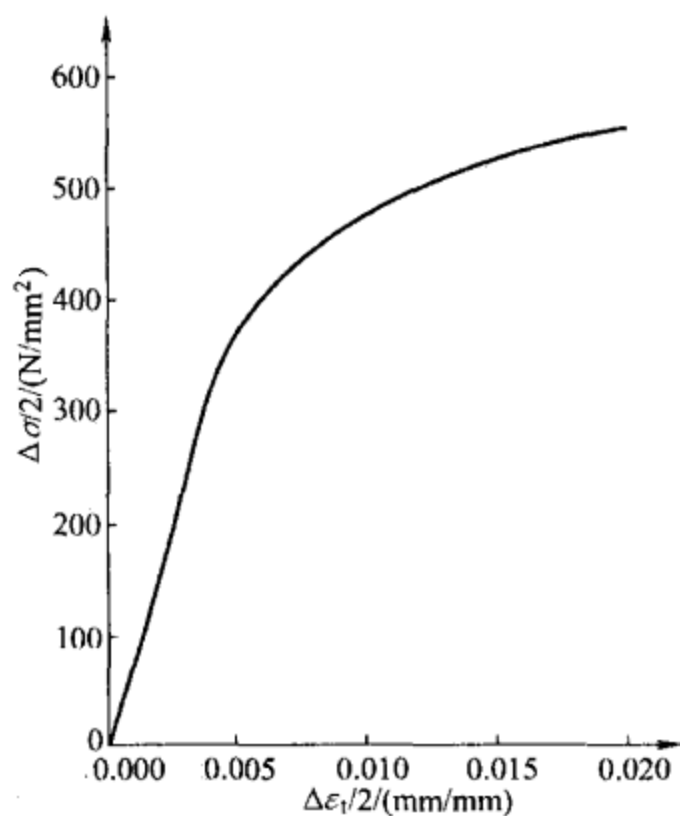


图 11-36 循环应力-应变曲线

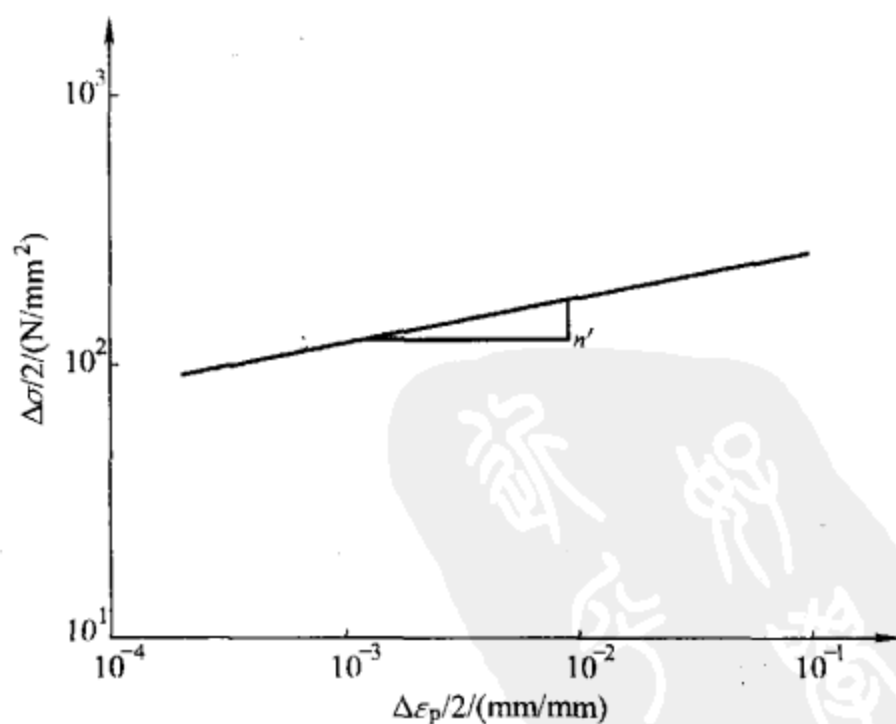


图 11-37  $\Delta\sigma/2$ - $\Delta\varepsilon_p/2$  曲线

$n'$ —循环应变硬化指数

(4) 循环硬化 在循环加载过程中, 当控制应变恒定时, 其应力随循环数增加而增加然后渐趋稳定的现象。

(5) 循环软化 在循环加载过程中, 当控制应变恒定时, 其应力随循环数的增加而降低然后渐趋稳定的现象。

## 11.6.2 试样

### 1. 圆形截面试样

1) 圆形截面试样有等截面试样和漏斗形试样。等截面试样如图 11-38a 所示, 工程测试中用的最多, 通常用于 2% 以内的总应变范围的试验。漏斗形试样如图 11-38b 所示, 选用时应根据材料的各向异性和抗弯性确定, 通常用于大于 2% 总应变范围的试验, 其曲率半径与试样最小半径之比一般为 12:1。

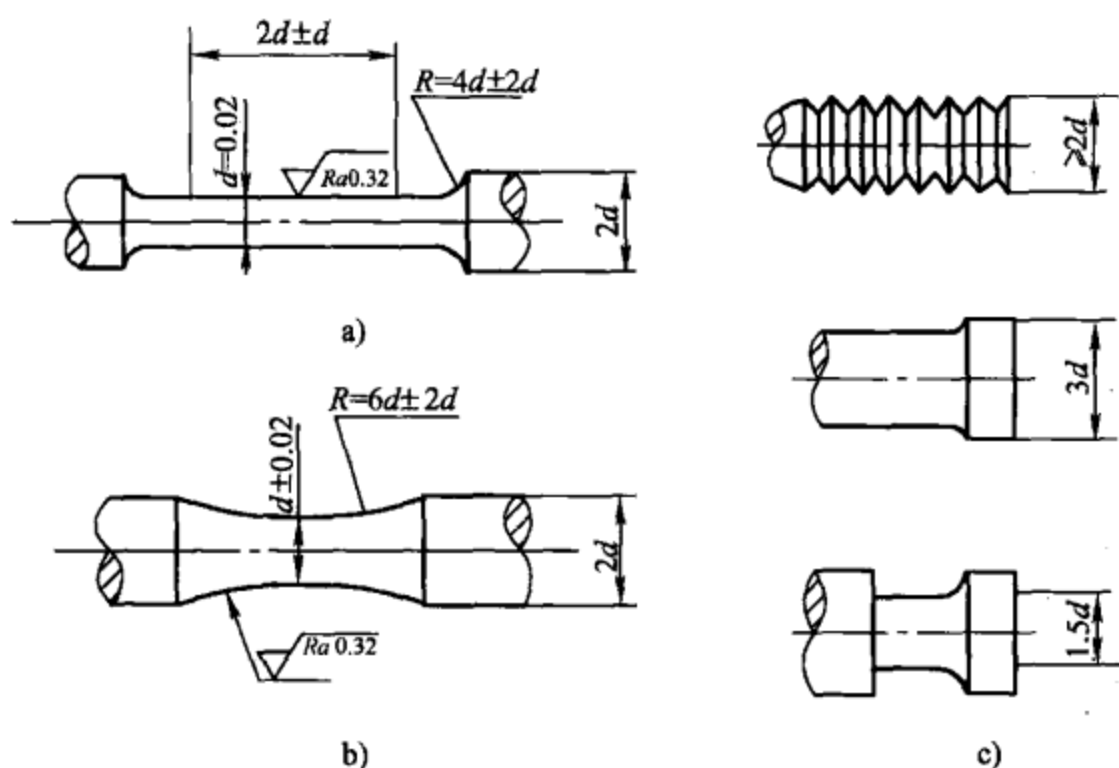


图 11-38 低循环疲劳试样

a) 等截面试样 b) 漏斗形试样 c) 夹持部位的形状及尺寸

2) 当材料是各向异性时, 应采用等截面试样。

3) 试样工作部分的最小直径为 5mm。

### 2. 板材试样

低循环疲劳板材试样的板厚小于 6mm 时, 可采用图 11-39 所示的试样, 但必须有特殊加持装置。矩形横截面试样适合于 2.5mm 的板厚、施加 1% 的总应变幅值, 如图 11-39a 所示。对于较高的应变幅值, 一般采用图 11-39b 所示的圆形截面漏斗形试样。

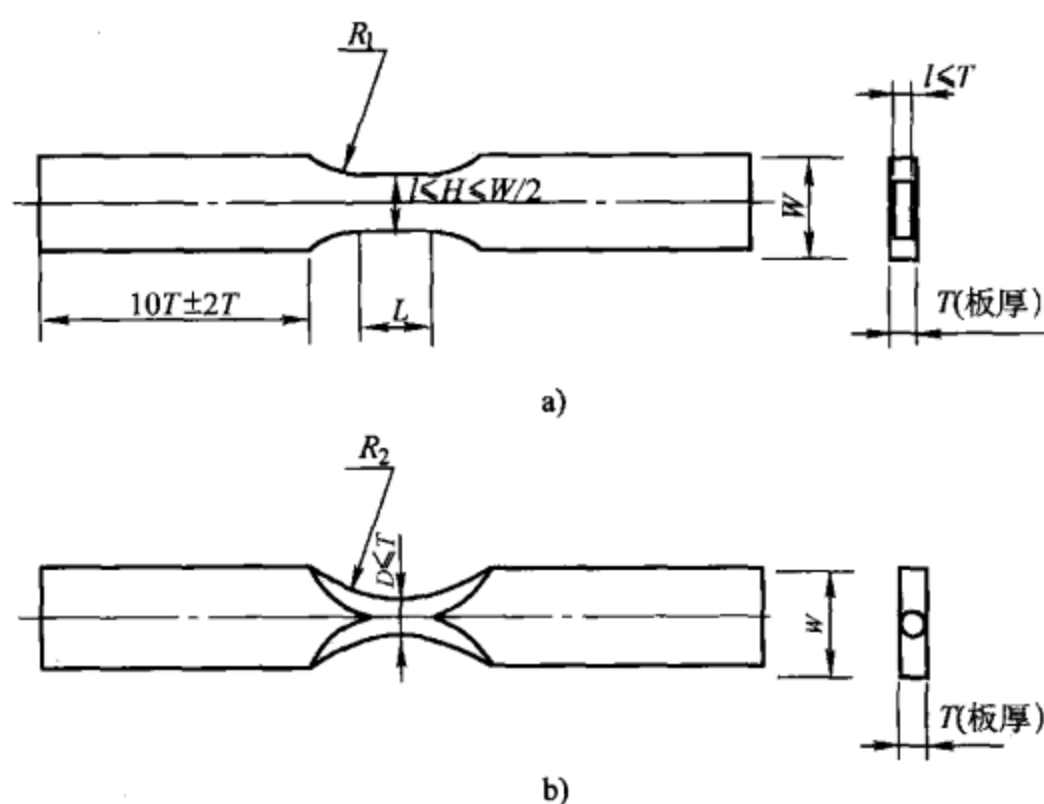


图 11-39 低循环疲劳板材试样

a) 矩形截面试样 b) 圆形截面试样

### 3. 非标准试样

非标准试样也可设计成管状试样或直径小于 5mm 的圆形截面试样。轴向应变控制等截面试样的标距长度与工作部分直径之比不大于 4，试样夹持部分的截面积与工作部分截面积之比不小于 4，试样工作部分与夹持部分的同轴度误差应在 0.01 mm 以内。

## 11.6.3 试验设备及试验条件

### 1. 试验机

- 1) 使用能控制载荷和变形的拉-压低循环疲劳试验机。
- 2) 试验机的静载荷按 JJG 556—1988《轴向加荷疲劳试验机》进行定期检定，其系统误差不大于  $\pm 1\%$ ，偏差不大于 1%。若误差达  $\pm 2\%$  时仍可使用，但必须做出校正曲线并加以修正。误差超过  $\pm 2\%$  时，不允许使用。
- 3) 相继两循环的重复性应在所试应力或应变范围的 1% 以内，或平均范围的 0.5% 以内，整个试验过程应稳定在 2% 以内。

### 2. 夹具

- 1) 连接试样的夹头可采用任何形式，如螺纹或带台肩等，但试验时试样与夹头和试验机的连接应固紧，以免载荷换向时试样与夹头松动或造成间隙。
- 2) 高温试验时应对夹具进行冷却，可防止载荷链中的其他元件受到损坏。
- 3) 应具有良好的同轴度。

### 3. 应变引伸计

- 1) 应变引伸计应适合于长时间内动态测量和控制, 测量试样标距长度内的变形时, 测量精度应不大于  $\pm 1\%$ 。
- 2) 根据所用试样选取轴向的或径向的应变引伸计, 如图 11-40、图 11-41 所示。
- 3) 每次试验后, 引伸计应进行标定。

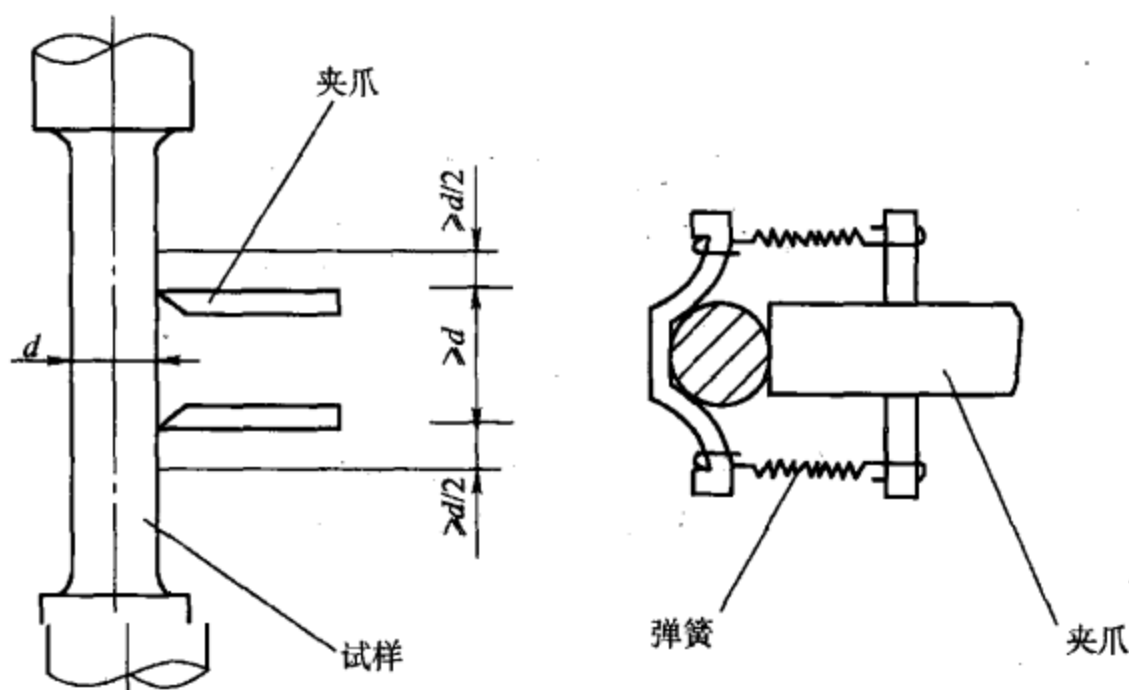


图 11-40 轴向应变引伸计

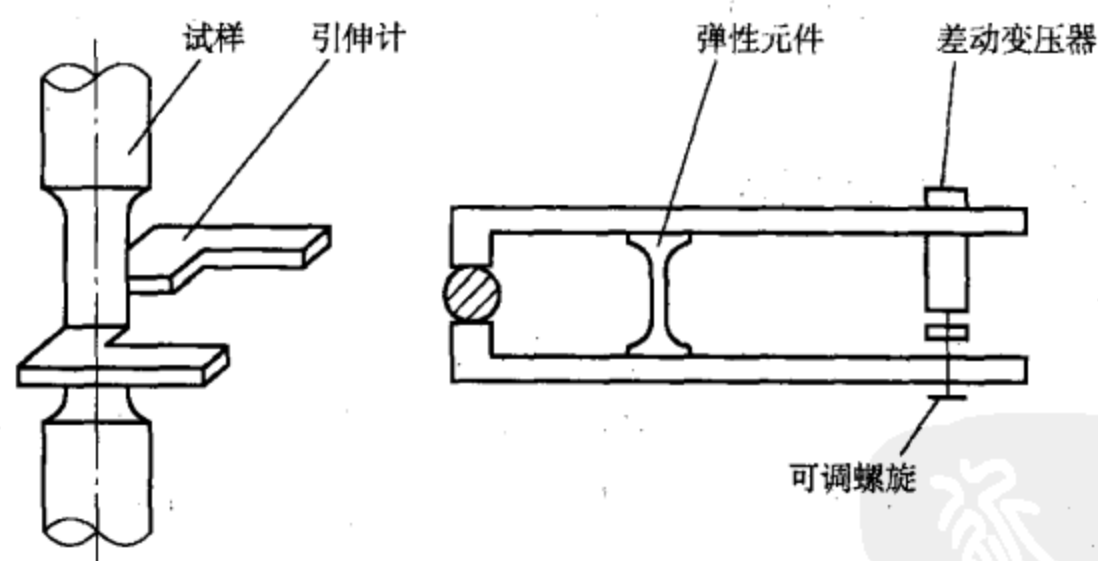


图 11-41 径轴应变引伸计

### 4. 数据采集与记录系统

- 1) 数据记录的准确度应保持在满量程的 1% 以内。
- 2) 用电子计算机数据采集系统, 对载荷、变形及循环次数等试验数据进行采集和存储。数据采集的频率应满足清楚记录应力-应变迟滞回线的需要, 采集和存储的数据可随时绘制曲线或传输至打印机。
- 3) 在条件不具备时, 可使用 X-Y 记录仪或带照相功能的示波器记录载荷-变形

或应力-应变迟滞回线；使用循环计数器记录总的循环数，并附带一计时器，以便对循环计数器和频率进行检验。

4) 使用漏斗形试样进行径向应变控制的低循环疲劳试验时，试验采集的是径向应变信号，一般使用应变计算机将径向应变和轴向应力转换成轴向应变。

### 11.6.4 试验步骤

#### 1. 试验环境

1) 室温试验时，应对温度进行检测和记录，超出  $10 \sim 35^{\circ}\text{C}$  范围的温度应在报告中说明。

2) 高温试验时，试样工作部分的温度波动应不大于  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，标距长度内的温度梯度应在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  或试验温度的 1%（两者取较大值）以内，否则应在报告中说明。

3) 高温试验可采用高频感应炉、辐射炉或电阻炉加热。为使试样温度均匀，应有足够的保温时间。使用前两种方法时，应在炉子和试样之间设一个均热屏。

4) 在空气中进行试验时，应对湿度进行控制。

#### 2. 试样尺寸的测量

为准确计算试样的横截面积，应采用读数精度不低于  $0.01\text{mm}$  的测量仪器来测量试样尺寸。对于等截面试样，应在标距长度内至少两个不同位置进行直径测量。

#### 3. 试验机的控制

1) 根据试验目的，试验时可以控制一个或几个变量，并同时监测其他变量随循环的变化。

2) 低循环疲劳试验中，一般控制总应变范围。根据试验要求也可控制非弹性应变范围。对于低延性材料和较长寿命的低循环疲劳试验，非弹性应变范围很小。若既能保持所要求的应变范围，又能对其载荷范围进行定期调整时，允许控制载荷。

3) 为了实现能连续控制所规定的试验变量，一般采用闭环控制疲劳试验机。若使用非连续可控的闭环试验机，则应严格控制所用变量的极限。

4) 对于各向异性材料，如定向凝固、单晶材料等，应采用轴向应变控制。

5) 除试验目的是研究起始加载效应外，所有试验应从相同的拉伸或压缩半循环开始。

#### 4. 波形

1) 除试验目的是测定波形的影响外，在整个试验过程中应变或应力对时间波形应保持一致。在无特定要求或设备受限制时，一般采用三角波。

2) 带保持时间的高温低循环疲劳试验采用梯形波。

#### 5. 应变速率或循环频率

1) 除试验目的是测定应变速率或循环频率的影响外，对于每个试验，其应变

速率或循环频率应保持不变。

2) 若因为设备的限制使用非三角波, 不能进行恒定的应变速率试验, 或者由于时间的限制不能进行恒频率试验时, 则可采用其他的速率控制方法。通常采用恒定的平均应变速率 (应变范围和频率乘积的两倍)。当试验采用非弹性应变控制时, 最合适的方法是保持平均非弹性应变速率恒定。

3) 选用的应变速率或频率应足够低, 以确保试样温度升高不超过  $2^{\circ}\text{C}$ 。

## 6. 记录

若使用计算机数据采集系统, 应按适当的间隔 (如 1, 2, 5, 10, 20 等) 连续记录循环应力-应变数据。若无计算机数据采集系统, 可使用 X-Y 记录仪记录应力-应变迟滞回线。对于循环数超过 100 的试验可进行间断记录或抽样, 除记录最初的迟滞回线外还应至少记录 10 个迟滞回线。

## 7. 失效判定

1) 试样断裂。

2) 最大载荷或应力或拉伸卸载弹性模量降低一定的百分数。

3) 试样表面出现可检测裂纹, 此裂纹增长到符合试验目的要求的预定尺寸。

4) 拉伸卸载弹性模量  $E_{\text{NT}}$  与压缩卸载弹性模量  $E_{\text{NC}}$  的比值  $q_{\text{N}}$  降低至首个循环的 50%。

5) 迟滞回线的压缩部分出现拐点, 拐点的数值  $\sigma_{\text{c}}$ , 即峰值压应力减去压缩加载曲线拐点处的应力, 达到峰值压应力的某一规定百分数, 如图 11-42 所示。

## 8. 有效性判定

等截面试样断在标距长度内或漏斗形试样断在最小直径附近方为有效, 若断在其他位置或在断口上发现有杂质、孔洞或机加工缺陷等情况, 则结果无效。若试样总断在同一位置, 则可能是同轴度问题或引伸计安装造成的“刀口”断裂, 应立即纠正。

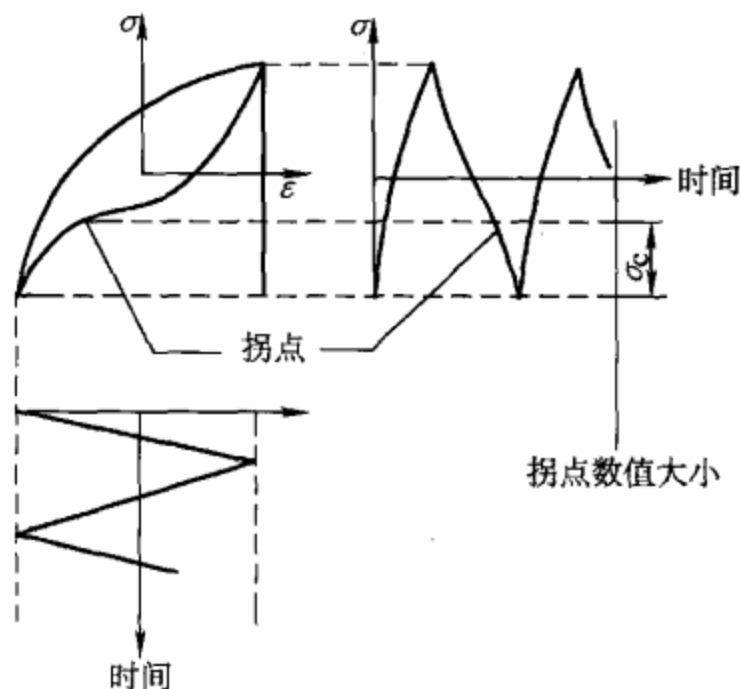


图 11-42 确定失效拐点的定义

## 11.6.5 试验结果的处理

1) 绘制出  $\Delta\sigma/2-2N_f$ 、 $\Delta\epsilon/2-2N_f$ 、 $\Delta\epsilon_e/2-2N_f$ 、 $\Delta\epsilon_p/2-2N_f$  曲线, 最常用的是双对数坐标。

数据处理时, 采用循环弹性模量  $E^*$  进行计算,  $E^*$  按下式计算:



$$E^* = \frac{E_{NT} + E_{NC}}{2}$$

式中  $E^*$ ——循环弹性模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$E_{NT}$ ——拉伸卸载模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ ;

$E_{NC}$ ——压缩卸载模量, 单位为  $\text{N/mm}^2$ 。

2) 根据所绘制的曲线, 计算出金属材料在所试条件下的疲劳延性指数、疲劳强度指数、疲劳延性系数和疲劳强度系数。

## 11.7 腐蚀疲劳循环失效试验

### 11.7.1 试验术语

(1) 腐蚀疲劳 金属在交变应变和腐蚀联合作用下产生的材料破坏过程, 通常导致破裂。当金属在腐蚀环境中遭受周期应变时, 发生腐蚀疲劳。

(2) 疲劳载荷的应力振幅( $S_0$ ) 一个周期内疲劳载荷应力极差的一半, 即  $S_0 = (S_{\max} - S_{\min})/2$ 。

(3) 疲劳载荷的平均应力( $S_m$ ) 指在恒定振幅载荷或载荷频谱单个循环中的最大应力值和最小应力值的代数平均值, 即  $S_m = (S_{\max} + S_{\min})/2$ 。

(4) 疲劳载荷的应力比( $R$ ) 一个循环周期内最小与最大应力值的代数比, 即  $R = S_{\min}/S_{\max}$ 。

(5)  $S$ - $N$  图 应力与试样断裂时循环周次的关系曲线, 通常  $N$  为对数坐标,  $S$  为线性坐标或对数坐标。

(6) 疲劳缺口系数( $K_f$ ) 在相同载荷和环境条件下, 经过  $N$  次循环后, 同样幸存概率下的无应力集中试样的疲劳强度与有应力集中试样的疲劳强度的比值。在规定  $K_f$  时, 必须指定试样的几何形状、应力幅值、平均应力值和估算的  $N$  值。

(7) 应力集中系数( $K_t$ ) 在缺口处或其他由弹性理论计算出的应力集中区域的最大应力与相应的标称应力之比。当缺口根部的应力超过屈服强度时  $K_t$  无效。

(8) 波形 载荷的两个相邻波峰之间形状变化, 是时间的函数。

(9) 循环频率( $f$ ) 单位时间内的循环次数, 通常用每秒循环次数来表示。

(10)  $N$  次载荷循环时的疲劳强度( $S_N$ ) 由  $S$ - $N$  图所确定的试样断裂时的准确循环次数  $N$  对应的应力值, 这样确定的  $S_N$  条件与  $S$ - $N$  图相同。

(11) 疲劳强度极限( $S_f$ ) 作为疲劳寿命的疲劳强度中值的极限值, 会使循环次数  $N$  变得很大, 大部分材料和环境都不能获得意义明确的疲劳极限。

### 11.7.2 试验原理

在侵蚀性环境条件下, 金属或合金的疲劳强度的下降程度取决于环境和试验条

件的状况。例如，钢在空气中观察到的明显疲劳强度极限，在侵蚀性环境中将不再明显。因此，试验结果的解释是基于部件允许寿命假设的。

金属材料腐蚀疲劳循环失效试验是在逐步减小的交变应力下，使用不同的应力循环次数，使暴露在腐蚀性或其他化学活性环境中的一系列试样产生疲劳裂纹，并扩展到足够大而引起失效。目的是由  $S-N$  曲线确定  $N$  次循环、疲劳强度  $S_N$  或疲劳寿命很大时的疲劳强度极限值。

### 11.7.3 试样

#### 1. 一般要求

1) 试样的设计和类型取决于使用的疲劳测试机、疲劳研究的目的，以及取样材料的形式。设计疲劳试验试样应根据加载方式而定，包括轴向加载、平面变曲、旋转梁、交替扭转或组合应力等。

2) 试样可以是圆形、正方形、矩形、环形，或特殊条件下其他形状的横截面。

3) 装夹端可以是适合试验机夹持器的任何形状，试样的装夹端与腐蚀试验环境应该相隔离。

4) 应减少试样试验阶段的横截面面积，以防止装夹失效。

5) 试样在工作段到装夹端的过渡部分，使任何应力集中都减小到最小值。一般均匀过渡的倒角半径至少为工作段直径或宽度的 8 倍，装夹端的横截面面积应至少为试样工作段横截面积的 4 倍，工作段长度应是其直径或宽度的 3 倍以上。在压缩试验中，为了将挠度减到最小，工作段长度应该小于其直径或宽度的 4 倍。

6) 为了得到要求的应力而计算施加载荷，计算面积的尺寸测量误差应在 0.02mm 以内。

#### 2. 圆柱形试样

装夹端之间由连续半径连接，且在中心具有最小半径的试样，如图 11-43 所示。此类型试样适用于旋转弯曲试验。

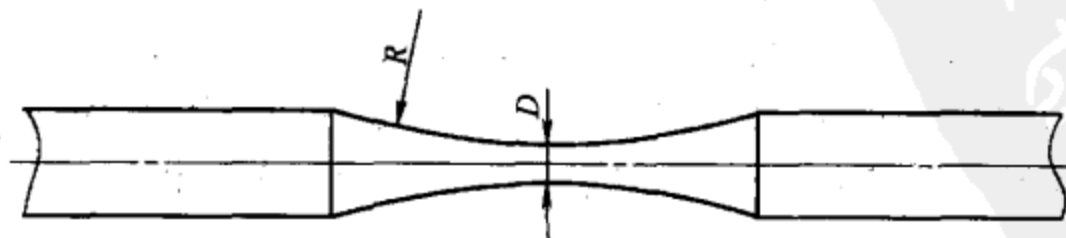


图 11-43 装夹端之间由连续半径连接的试样

#### 3. 缺口试样

1) 通过对比缺口试样和光滑试样的  $S-N$  曲线，可以确定机加工缺口对腐蚀疲

劳强度的影响。通常根据网状横截面试样上的公称应力，来标定缺口试样的数据。

2) 缺口对于降低疲劳极限的作用可以通过疲劳缺口系数  $K_f$  (即光滑试样的疲劳极限与缺口试样的疲劳极限的比值) 来表示。

3) 在疲劳试验中，一种材料的缺口敏感度用缺口敏感度系数  $q$  来表示， $q = (K_f - 1)/(K_t - 1)$ ， $K_t$  是应力集中系数。 $q = 0$  表示缺口对材料疲劳极限无影响， $q = 1$  表示缺口产生完整的假设效果。

#### 4. 表面粗糙度

随着表面粗糙度值的降低，疲劳寿命会升高。因此，对于腐蚀疲劳试验试样必须注意表面的准备工作。一般使用无加工沟纹和划痕的表面进行金相抛光，抛光方向与施加应力方向相同。

#### 5. 表面残余应力

1) 压缩残余应力会增大疲劳强度，拉伸残余应力会有相反的趋势。

2) 表面残余应力会影响局部腐蚀性能，从而影响腐蚀疲劳裂纹的产生。

3) 喷丸处理工艺会改变表面压缩应力，从而改善腐蚀疲劳性能。

### 11.7.4 试验装置及试验条件

1) 疲劳试验机应符合使用要求，有相应的周期频率和波形信号，同时配备合适的循环计数和载荷监控系统。

2) 疲劳试验机的调整应保证施加的载荷呈轴对称。

3) 环境箱应能将试样在工作段完全密封。一般试样的装夹部分应该在溶液环境之外，以阻止电池效应和缝隙腐蚀。如果无法达到要求，应该采取适当的避免措施。

4) 要有适当的溶液体积与金属表面积的比率，一般由反应速率和暴露时间决定。

5) 当试验在气体环境中进行时，首选使用全金属箱。

### 11.7.5 试验步骤

1) 试样先进行脱脂，然后固定在环境箱中的试样夹具上，应尽量防止由于夹具旋转或对称轴位置移动而产生不对称。

2) 用分析纯药品配制的试验环境，应代表实际使用条件或者符合适当的标准。

3) 气体环境应使用高纯试验室级别的气体。

4) 在试验期间，对环境应该依据要求进行检测和控制。在无缓冲体系中，可以使用 pH 值自动控制系统，使 pH 值保持恒定；否则，需要评定 pH 值变化对裂纹生长的影响。

5) 在开放性系统中, 可通过溶液中气体冒泡进行充气。在封闭性系统中, 必须进行监测。适当时, 应该控制系统的压力。试验中的流速应该模拟在使用条件下的范围。

6) 溶液温度的变化应该控制在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

7) 试验应持续进行, 直到试样失效或达到预定的循环次数。

第 12 章 铸铁和铸钢的力学性能

12.1 铸铁的力学性能

12.1.1 灰铸铁的力学性能

1. 灰铸铁件单铸试棒的抗拉强度（表 12-1）

表 12-1 灰铸铁件单铸试棒的抗拉强度（GB/T 9439—1988）

牌 号	HT100	HT150	HT200	HT250	HT300	HT350
抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	100	150	200	250	300	350

注：1. 棒须用浇注铸件的同一批铁液用砂型竖浇，试棒的开箱温度不得高于 500℃。  
2. 验收时，HTn 牌号的灰铸铁，其抗拉强度应在  $n \sim (n + 100) N/mm^2$  的范围内。

2. 灰铸铁件附铸试棒（块）的抗拉强度（表 12-2）

表 12-2 灰铸铁件附铸试棒（块）的抗拉强度（GB/T 9439—1988）

牌 号	铸件壁厚/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$				
		附 铸 试 棒		附 铸 试 块		铸件
		$\phi 30mm$	$\phi 50mm$	R15mm	R25mm	
HT150	> 20 ~ 40	130	—	(120)	—	120
	> 40 ~ 80	115	(115)	110	—	105
	> 80 ~ 150	—	105	—	100	90
	> 150 ~ 300	—	100	—	90	80
HT200	> 20 ~ 40	180	—	(170)	—	165
	> 40 ~ 80	160	(155)	150	—	145
	> 80 ~ 150	—	145	—	140	130
	> 150 ~ 300	—	135	—	130	120
HT250	> 20 ~ 40	220	—	(210)	—	205
	> 40 ~ 80	200	(190)	190	—	180
	> 80 ~ 150	—	180	—	170	165
	> 150 ~ 300	—	165	—	160	150

(续)

牌 号	铸件壁厚/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$				
		附 铸 试 棒		附 铸 试 块		铸件
		$\phi 30mm$	$\phi 50mm$	$R15mm$	$R25mm$	
HT300	> 20 ~ 40	260	—	(250)	—	245
	> 40 ~ 80	235	(230)	225	—	215
	> 80 ~ 150	—	210	—	200	195
	> 150 ~ 300	—	195	—	185	180
HT350	> 20 ~ 40	300	—	(290)	—	285
	> 40 ~ 80	270	(265)	260	—	255
	> 80 ~ 150	—	240	—	230	225
	> 150 ~ 300	—	215	—	210	205

注：圆括号内的数值仅适用于铸件壁厚大于试件直径时。

3. 不同壁厚的灰铸铁件的抗拉强度（表 12-3）

表 12-3 不同壁厚的灰铸铁件的抗拉强度（GB/T 9439—1988）

牌号	铸件壁厚/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	牌号	铸件壁厚/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$
HT100	> 2.5 ~ 10	130	HT200	> 30 ~ 40	160
	> 10 ~ 20	100	HT250	> 40 ~ 10	270
	> 20 ~ 30	90		> 10 ~ 20	240
	> 30 ~ 40	80		> 20 ~ 30	220
HT150	> 2.5 ~ 10	175		> 30 ~ 40	200
	> 10 ~ 20	145	HT300	> 10 ~ 20	290
	> 20 ~ 30	130		> 20 ~ 30	250
	> 30 ~ 40	120		> 30 ~ 40	230
HT200	> 2.5 ~ 10	220	HT350	> 10 ~ 20	340
	> 10 ~ 20	195		> 20 ~ 30	290
	> 20 ~ 30	170		> 30 ~ 40	260

4. 灰铸铁件的硬度牌号及硬度范围（表 12-4）

表 12-4 灰铸铁件硬度牌号及硬度范围（GB/T 9439—1988）

硬 度 牌 号	H145	H175	H195	H215	H235	H255
铸件的硬度范围 HBW	$\leq 170$	150 ~ 200	170 ~ 220	190 ~ 240	210 ~ 260	230 ~ 280

12.1.2 白口铸铁的力学性能

1. 抗磨白口铸铁件的硬度（表 12-5）

表 12-5 抗磨白口铸铁件的硬度（GB/T 8263—1999）

牌 号	硬 度					
	铸态或铸态并去 应力处理		硬化态或硬化态并去 应力处理		软化退火态	
	HRC	HBW	HRC	HBW	HRC	HBW
KmTBNi4Cr2-DT	≥53	≥550	≥56	≥600	—	—
KmTBNi4Cr2-GT	≥53	≥550	≥56	≥600	—	—
KmTBCr9Ni5	≥50	≥500	≥56	≥600	—	—
KmTBCr2	≥46	≥450	≥56	≥600	≤41	≤400
KmTBCr8	≥46	≥450	≥56	≥600	≤41	≤400
KmTBCr12	≥46	≥450	≥56	≥600	≤41	≤400
KmTBCr15Mo	≥46	≥450	≥58	≥650	≤41	≤400
KmTBCr20Mo	≥46	≥450	≥58	≥650	≤41	≤400
KmTBCr26	≥46	≥450	≥56	≥600	≤41	≤400

2. 泵用抗磨白口铸铁件的硬度（表 12-6）

表 12-6 泵用抗磨白口铸铁件的硬度（JB/T 6880.3—1993）

牌 号	铸 态		淬 火 态	
	硬度 HRC	硬度 HBW	硬度 HRC	硬度 HBW
KmTBMn2W2	≥38	≥350	—	—
KmTBMn5Mo2	≥53	≥520	—	—
KmTBCr15Mo3	≥40	≥490	≥58	≥600

12.1.3 蠕墨铸铁的力学性能

1. 蠕墨铸铁件的力学性能（表 12-7）

表 12-7 蠕墨铸铁件的力学性能（JB/T 4403—1999）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	硬度值范围 HBW	蠕化率 (%)	主要基本组织
	≥	≥	≥		≥	
RuT420	420	335	0.75	200 ~ 280	50	珠光体
RuT380	380	300	0.75	193 ~ 274		珠光体
RuT340	340	270	1.0	170 ~ 249		珠光体 + 铁素体
RuT300	300	240	1.5	140 ~ 217		铁素体 + 珠光体
RuT260	260	195	3	121 ~ 197		铁素体



2. 船用蠕墨铸铁件的力学性能（表 12-8）

表 12-8 船用蠕墨铸铁件的力学性能（CB/T 3647—1994）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$ $\geq$	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$	硬度 HBW
RUT 300C	300	210	2	130 ~ 180
RUT 350	350	245	1	160 ~ 240
RUT 400	400	280	1	200 ~ 280

12.1.4 球墨铸铁的力学性能

1. 球墨铸铁件单铸试样的力学性能（表 12-9）

表 12-9 球墨铸铁件单铸试样的力学性能（GB/T 1348—2009）

材料牌号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$ $\geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$	布氏硬度 HBW	主要基体组织
QT350-22L	350	220	22	$\leq 160$	铁素体
QT350-22R	350	220	22	$\leq 160$	铁素体
QT350-22	350	220	22	$\leq 160$	铁素体
QT400-18L	400	240	18	120 ~ 175	铁素体
QT400-18R	400	250	18	120 ~ 175	铁素体
QT400-18	400	250	18	120 ~ 175	铁素体
QT400-15	400	250	15	120 ~ 180	铁素体
QT450-10	450	310	10	160 ~ 210	铁素体
QT500-7	500	320	7	170 ~ 230	铁素体 + 珠光体
QT550-5	550	350	5	180 ~ 250	铁素体 + 珠光体
QT600-3	600	370	3	190 ~ 270	珠光体 + 铁素体
QT700-2	700	420	2	225 ~ 305	珠光体
QT800-2	800	480	2	245 ~ 335	珠光体或索氏体
QT900-2	900	600	2	280 ~ 360	回火马氏体或 托氏体 + 索氏体

2. 球墨铸铁件 V 形缺口单铸试样的冲击吸收功（表 12-10）

表 12-10 球墨铸铁件 V 形缺口单铸试样的冲击吸收功（GB/T 1348—2009）

牌 号	最小冲击吸收功/J					
	室温(23 ± 5)℃		低温( - 20 ± 2)℃		低温( - 40 ± 2)℃	
	三个试样平均值	个别值	三个试样平均值	个别值	三个试样平均值	个别值
QT350-22L	—	—	—	—	12	9
QT350-22R	17	14	—	—	—	—
QT400-18L	—	—	12	9	—	—
QT400-18R	14	11	—	—	—	—

注：冲击吸收功是从砂型铸造的铸件或者导热性与砂型相当的铸型中铸造的铸块上测得的。用其他方法生产的铸件的冲击吸收功应满足经双方协商的修正值。

3. 球墨铸铁件附铸试样的力学性能（表 12-11）

表 12-11 球墨铸铁件附铸试样的力学性能（GB/T 1348—2009）

材料牌号	铸件壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A$ (%) ≥	布氏硬度 HBW	主要基体组织
QT350-22AL	≤30	350	220	22	≤160	铁素体
	> 30 ~ 60	330	210	18		
	> 60 ~ 200	320	200	15		
QT350-22AR	≤30	350	220	22	≤160	铁素体
	> 30 ~ 60	330	220	18		
	> 60 ~ 200	320	210	15		
QT350-22A	≤30	350	220	22	≤160	铁素体
	> 30 ~ 60	330	210	18		
	> 60 ~ 200	320	200	15		
QT400-18AL	≤30	380	240	18	120 ~ 175	铁素体
	> 30 ~ 60	370	230	15		
	> 60 ~ 200	360	220	12		
QT400-18AR	≤30	400	250	18	120 ~ 175	铁素体
	> 30 ~ 60	390	250	15		
	> 60 ~ 200	370	240	12		
QT400-18A	≤30	400	250	18	120 ~ 175	铁素体
	> 30 ~ 60	390	250	15		
	> 60 ~ 200	370	240	12		

(续)

材料牌号	铸件壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长 率 A(%) ≥	布氏硬度 HBW	主要基 体组织
QT400-15A	≤30	400	250	15	120 ~ 180	铁素体
	> 30 ~ 60	390	250	14		
	> 60 ~ 200	370	240	11		
QT450-10A	≤30	450	310	10	160 ~ 210	铁素体
	> 30 ~ 60	420	280	9		
	> 60 ~ 200	390	260	8		
QT500-7A	≤30	500	320	7	170 ~ 230	铁素体 + 珠光体
	> 30 ~ 60	450	300	7		
	> 60 ~ 200	420	290	5		
QT550-5A	≤30	550	350	5	180 ~ 250	铁素体 + 珠光体
	> 30 ~ 60	520	330	4		
	> 60 ~ 200	500	320	3		
QT600-3A	≤30	600	370	3	190 ~ 270	珠光体 + 铁素体
	> 30 ~ 60	600	360	2		
	> 60 ~ 200	550	340	1		
QT700-2A	≤30	700	420	2	225 ~ 305	珠光体
	> 30 ~ 60	700	400	2		
	> 60 ~ 200	650	380	1		
QT800-2A	≤30	800	480	2	245 ~ 335	珠光体或 索氏体
	> 30 ~ 60	由供需双方商定				
	> 60 ~ 200					
QT900-2A	≤30	900	600	2	280 ~ 360	回火马氏 体或索氏 体 + 托氏体
	> 30 ~ 60	由供需双方商定				
	> 60 ~ 200					

4. 球墨铸铁件 V 形缺口单铸试样的冲击吸收功（表 12-12）

表 12-12 球墨铸铁件 V 形缺口单铸试样的冲击吸收功（GB/T 1348—2009）

牌 号	铸件壁厚 /mm	最小冲击吸收功/J					
		室温(23±5)℃		低温( -20±2)℃		低温( -40±2)℃	
		三个试样 平均值	个别值	三个试样 平均值	个别值	三个试样 平均值	个别值
QT350-22AR	≤60	17	14	—	—	—	—
	>60 ~ 200	15	12	—	—	—	—
QT350-22AL	≤60	—	—	—	—	12	9
	>60 ~ 200	—	—	—	—	10	7
QT400-18AR	≤60	14	11	—	—	—	—
	>60 ~ 200	12	9	—	—	—	—
QT400-18AL	≤60	—	—	12	9	—	—
	>60 ~ 200	—	—	10	7	—	—

注：从附铸试样测得的力学性能并不能准确地反映铸件本体的力学性能，但与单铸试棒上测得的值相比更接近于铸件的实际性能值。

5. 铸件本体的规定非比例延伸强度（表 12-13）

表 12-13 铸件本体的规定非比例延伸强度（GB/T 1348—2009）

材料牌号	不同壁厚 δ 下的规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$			
	$\delta \leq 50mm$	$50mm < \delta \leq 80mm$	$80mm < \delta \leq 120mm$	$120mm < \delta \leq 200mm$
QT400-15	250	240	230	230
QT500-7	290	280	270	260
QT550-5	320	310	300	290
QT600-3	360	340	330	320
QT700-2	400	380	370	360

6. 电力金具球墨铸铁件的力学性能（表 12-14）

表 12-14 电力金具球墨铸铁件的力学性能（DL/T 768.4—2002）

牌号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长 率 A(%)	供 参 考	
				布氏硬度 HBW	主要金相组织
QT400-18	400	250	18	130 ~ 180	铁素体
QT400-15	400	250	15	130 ~ 180	铁素体
QT450-10	450	310	10	160 ~ 210	铁素体
QT500-7	500	320	7	170 ~ 230	铁素体 + 珠光体
QT600-3	600	370	3	190 ~ 270	珠光体 + 铁素体
QT700-2	700	420	2	225 ~ 305	珠光体
QT800-2	800	480	2	245 ~ 335	珠光体或回火组织
QT900-2	900	600	2	280 ~ 360	贝氏体或回火马氏体

7. 连续铸造球墨铸铁管的力学性能（表 12-15）

表 12-15 连续铸造球墨铸铁管的力学性能（YB/T 177—2000）

公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	管环抗弯强度 /(N/mm <sup>2</sup> )	管环压扁率 (%)
100 ~ 350	≥400	≥2	≥680	≥5
400 ~ 2600				≥8

注：抗拉强度、断后伸长率和管环抗弯强度、管环压扁率交货时任选一组。

8. 水泥内衬离心球墨铸铁管及管件的力学性能（表 12-16）

表 12-16 水泥内衬离心球墨铸铁管及管件的力学性能（CJ/T 161—2002）

公称直径/mm		抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
直管	100 ~ 1000	≥420	≥300	≥10
	1200 ~ 2600			≥7
管件		≥400	≥300	≥5

12.1.5 可锻铸铁的力学性能

1. 黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的力学性能（表 12-17）

表 12-17 黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的力学性能（GB/T 9440—1988）

牌 号		试样直径 $d/\text{mm}$	抗拉强度 $R_m$ $/(\text{N}/\text{mm}^2)$	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(\text{N}/\text{mm}^2)$	断后伸长率 $A(\%) L_0 = 3d$	硬度 HBW
A	B		$\geq$			
KTH300-06		12 或 15	300	—	6	> 150
	KTH330-08		330		8	
KTH350-10			350	200	10	
	KTH370-12		370	—	12	
KTZ450-06			450	270	6	150 ~ 200
KTZ550-04			550	340	4	180 ~ 230
KTZ650-02			650	430	2	210 ~ 260
KTZ700-02			700	530	2	240 ~ 290

注：1. 直径为 12mm 的试件只适用于铸件主要壁厚小于 10mm 的铸件。  
2. 牌号 KTH300-06 适用于气密性零件。  
3. 黑心可锻铸铁的金相组织主要是铁素体基体 + 团絮状石墨；珠光体可锻铸铁的金相组织主要是珠光体基体 + 团絮状石墨。

2. 白心可锻铸铁的力学性能（表 12-18）

表 12-18 白心可锻铸铁的力学性能（GB/T 9440—1988）

牌 号	试样直径 $d/\text{mm}$	抗拉强度 $R_m$ $/(\text{N}/\text{mm}^2)$	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(\text{N}/\text{mm}^2)$	断后伸长率 $A(\%)L_0=3d$	硬度 HBW $\leq$
		$\geq$			
KTB350-04	9	340	—	5	230
	12	350		4	
	15	360		3	
KTB380-12	9	320	170	15	200
	12	380	200	12	
	15	400	210	8	
KTB400-05	9	360	200	8	220
	12	400	220	5	
	15	420	230	4	
KTB450-07	9	400	230	10	220
	12	450	260	7	
	15	480	280	4	

3. 电力金具可锻铸铁件的力学性能（表 12-19）

表 12-19 电力金具可锻铸铁件的力学性能（DL/T 768.1—2002）

牌号	试样直径 $d$ $/\text{mm}$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/\text{mm}^2)$	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/\text{mm}^2)$	断后伸长率 $A(\%)$ $L_0=3d$	硬度 HBW
		$\geq$			$\leq$
KTH330-08	$15 \pm 0.7$	330	—	8	150
KTH350-10		350	200	10	
KTH370-12		370	—	12	

12.1.6 耐热耐蚀铸铁的力学性能

1. 耐热铸铁的室温力学性能（表 12-20）

表 12-20 耐热铸铁的室温力学性能（GB/T 9437—2009）

铸 铁 牌 号	最小抗拉强度 $R_m/(N/\text{mm}^2)$	硬度 HBW
HTRCr	200	189 ~ 288
HTRCr2	150	207 ~ 288
HTRCr16	340	400 ~ 450
HTRSi5	140	160 ~ 270
QTRSi4	420	143 ~ 187
QTRSi4Mo	520	188 ~ 241

(续)

铸 铁 牌 号	最小抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	硬度 HBW
QTRSi4Mo1	550	200 ~ 240
QTRSi5	370	228 ~ 302
QTRAl4Si4	250	285 ~ 341
QTRAl5Si5	200	302 ~ 363
QTRAl22	300	241 ~ 364

注：允许用热处理方法达到上述性能。

2. 耐热铸铁的高温短时抗拉强度（表 12-21）

表 12-21 耐热铸铁的高温短时抗拉强度（GB/T 9437—2009）

铸铁牌号	在下列温度时的最小抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$				
	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃
HTRCr	225	144	—	—	—
HTRCr2	243	166	—	—	—
HTRCr16	—	—	—	144	88
HTRSi5	—	—	41	27	—
QTRSi4	—	—	75	35	—
QTRSi4Mo	—	—	101	46	—
QTRSi4Mo1	—	—	101	46	—
QTRSi5	—	—	67	30	—
QTRAl4Si4	—	—	—	82	32
QTRAl5Si5	—	—	—	167	75
QTRAl22	—	—	—	130	77

3. 高硅耐蚀铸铁的力学性能（表 12-22）

表 12-22 高硅耐蚀铸铁的力学性能（GB/T 8491—2009）

牌 号	最小抗弯强度/(N/mm <sup>2</sup> )	最小挠度/mm
HTSSi11Cu2CrR	190	0.80
HTSSi15R	118	0.66
HTSSi15Cr4MoR	118	0.66
HTSSi15Cr4R	118	0.66

12.1.7 耐磨铸铁的力学性能

1. 活塞环用耐磨铸铁的力学性能（表 12-23）



表 12-23 活塞环用耐磨铸铁的力学性能

名称	硬度 HRB	硬度差 HRB	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	弹性模量 $E$ /(N/mm <sup>2</sup> )	$E/\sigma_{bb}$	残余变 形 $c$ (%)	弹力消失 率 $\psi$ (%)
钨铸铁	101 ~ 103	3.0	469	88400	190	5.3	22.6
钨钒钛铸铁	100 ~ 102	3.0	485	95000	196	4.2	25
钨铬钼铸铁	98 ~ 102	3.0	500	76400 ~ 83400	150 ~ 168	5.6 ~ 10	25
钼铬铸铁	99 ~ 102	3.0	448	74300	164	6.0	25
钼铬铸铁	98 ~ 108	3.0	$\geq 550$	100000 ~ 140000	$\leq 220$	$< 10$	$\leq 20$
钼铬铜铸铁	96 ~ 107	3.0	$\geq 600$	100000 ~ 130000	$\leq 220$	$< 10$	18
钼铬铜铸铁	98 ~ 105	3.0	$\geq 600$	110000 ~ 140000	$\leq 220$	$< 10$	18
钼铬铜钛铸铁	98 ~ 105	3.0	$\geq 550$	100000 ~ 140000	$\leq 220$	$< 10$	18
镍铬钼铸铁	98 ~ 107	3.0	$\geq 550$	100000 ~ 130000	$\leq 220$	$< 10$	20
镍铬铸铁	98 ~ 106	3.0	$\geq 550$	100000 ~ 140000	$\leq 220$	—	20
铜钒钛铸铁	103 ~ 107	3.0	539	94300	176	4.5	24.6
磷铸铁	101 ~ 103	3.0	450	90600	201	5.5	25
磷稀土铸铁	100 ~ 102	3.0	440	87000	199	6.6	25

2. 机床导轨用耐磨铸铁的力学性能（表 12-24）

表 12-24 机床导轨用耐磨铸铁的力学性能

名称	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	挠度 $f$ /mm	硬度 HBW
		≥			
钒钛耐磨铸铁	MTVTi20	200	400	3.0	160 ~ 240
	MTVTi25	250	470		160 ~ 240
	MTVTi30	300	540		170 ~ 240
磷铜钛耐磨铸铁	MTPCuTi15	150	330	2.5	170 ~ 229
	MTPCuTi20	200	400	2.8	187 ~ 235
	MTPCuTi25	250	470		187 ~ 241
	MTPCuTi30	300	540		187 ~ 255
高磷耐 磨铸铁	MTP15	150	330	2.5	170 ~ 229
	MTP20	200	400	2.8	179 ~ 235
	MTP25	250	470		187 ~ 241
	MTP30	300	540		187 ~ 255

(续)

名称	牌 号	抗拉强度 $R_m$	抗弯强度 $\sigma_{bb}$	挠度 $f$	硬度 HBW
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$	$/mm$	
		$\geq$			
铬钼铜耐磨铸铁	MTCrMoCu25	250	470	3.0	185 ~ 230
	MTCrMoCu30	300	540		200 ~ 250
	MTCrMoCu35	350	610	3.5	220 ~ 260
铬铜耐磨铸铁	MTCrCu25	250	470	3.0	185 ~ 230
	MTCrCu30	300	540		200 ~ 240
	MTCrCu35	350	610	3.2	210 ~ 250

3. 气缸套用耐磨铸铁的力学性能 (表 12-25)

表 12-25 气缸套用耐磨铸铁的力学性能

名称	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	抗弯强度 $\sigma_{bb}/(N/mm^2)$	硬度 HBW	硬度差 HBW
磷铬铸铁	> 200	> 400	220 ~ 280	< 30
磷铸铁	> 200	> 400	> 220	< 30

4. 铬系铸铁磨球的力学性能 (表 12-26)

表 12-26 铬系铸铁磨球的力学性能 (YB/T 092—2005)

代号	表面硬度 HRC $\geq$	冲击吸收功 $A_K/J \geq$	冲击疲劳寿命(落球次数) $\geq$
ZQCrGA	56	3	8000
ZQCrGB	49		
ZQCrZA	51	3	8000
ZQCrZB	48		
ZQCrDA	48	2	8000
ZQCrDB	45		

12.2 铸钢的力学性能

1. 一般工程用铸造碳钢件的力学性能 (表 12-27)

表 12-27 一般工程用铸造碳钢件的力学性能 (GB/T 11352—2009)

牌号	上屈服强度 $R_{eH}$ (或 $R_{p0.2})/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A(\%)$	根据合同选择		
				断面收缩 率 $Z(\%)$	冲击性能	
					$A_{KV}/J$	$A_{KU}/J$
$\geq$						
ZG200-400	200	400	25	40	30	47
ZG230-450	230	450	22	32	25	35
ZG270-500	270	500	18	25	22	27
ZG310-570	310	570	15	21	15	24
ZG340-640	340	640	10	18	10	16

注：1. 表中所列性能适应于厚度 100mm 以下铸件，当厚度大于 100mm 时， $R_{eH}$  ( $R_{p0.2}$ ) 仅供设计使用。  
2.  $A_{KU}$  的试样缺口为 2mm。

2. 低合金铸钢的力学性能（表 12-28）

表 12-28 低合金铸钢的力学性能（GB/T 14408—1993）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}$ (或 $R_{p0.2})/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)	断面收缩率 $Z$ (%)
	$\geq$			
ZGD270-480	270	480	18	35
ZGD290-510	290	510	16	35
ZGD345-570	345	570	14	35
ZGD410-620	410	620	13	35
ZGD535-720	535	720	12	30
ZGD650-830	650	830	10	25
ZGD730-910	730	910	8	22
ZGD840-1030	840	1030	6	20

3. 大型低合金钢铸件的力学性能（表 12-29）

表 12-29 大型低合金钢铸件的力学性能（JB/T 6402—2006）

牌号	热处理 状态	上屈服强度	抗拉强度	断后伸长	断面收缩	冲击吸收功			硬度
		$R_{eH}/(N/mm^2) \geq$	$R_m/(N/mm^2) \geq$	率 $A(\%) \geq$	率 $Z(\%) \geq$	$A_{KU}/J \geq$	$A_{KV}/J \geq$	$A_{KDVM}/J \geq$	HBW $\geq$
ZG20Mn	正火 + 回火	285	495	18	30	39	—	—	145
	调质	300	500 ~ 650	24	—	—	45	—	150 ~ 190
ZG30Mn	正火 + 回火	300	558	18	30	—	—	—	163
ZG35Mn	正火 + 回火	345	570	12	20	24	—	—	—
	调质	415	640	12	25	27	—	27	200 ~ 240
ZG40Mn	正火 + 回火	295	640	12	30	—	—	—	163
ZG40Mn2	正火 + 回火	395	590	20	40	30	—	—	179
	调质	685	835	13	45	35	—	35	269 ~ 302
ZG45Mn2	正火 + 回火	392	637	15	30	—	—	—	179
ZG50Mn2	正火 + 回火	445	785	18	37	—	—	—	—
ZG35SiMnMo	正火 + 回火	395	640	12	20	24	—	—	—
	调质	490	690	12	25	27	—	27	—
ZG35CrMnSi	正火 + 回火	345	690	14	30	—	—	—	217
ZG20MnMo	正火 + 回火	295	490	16		39	—	—	156

(续)

牌号	热处理 状态	上屈服强度	抗拉强度	断后伸长	断面收缩	冲击吸收功			硬度
		$R_{eH}/(N/mm^2) \geq$	$R_m/(N/mm^2) \geq$	率 $A(\%) \geq$	率 $Z(\%) \geq$	$A_{KU}/J \geq$	$A_{KV}/J \geq$	$A_{KDV}/J \geq$	HBW $\geq$
ZG30Cr1MnMo	正火 + 回火	392	686	15	30	—	—	—	—
ZG55CrMnMo	正火 + 回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—
ZG40Cr1	正火 + 回火	345	630	18	26	—	—	—	212
ZG34Cr2Ni2Mo	调质	700	950 ~ 1000	12	—	—	32	—	240 ~ 290
ZG15Cr1Mo	正火 + 回火	275	490	20	35	24	—	—	140 ~ 220
ZG20CrMo	正火 + 回火	245	460	18	30	30	—	—	135 ~ 180
	调质	245	460	18	30	24	—	—	—
ZG35Cr1Mo	正火 + 回火	392	588	12	20	23.5	—	—	—
	调质	510	686	12	25	31	—	27	201
ZG42Cr1Mo	正火 + 回火	343	569	12	20	—	30	—	—
	调质	490	690 ~ 830	11	—	—	—	21	200 ~ 250
ZG50Cr1Mo	调质	520	740 ~ 880	11	—	—	—	34	200 ~ 260
ZG65Mn	正火 + 回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—
ZG28NiCrMo	—	420	630	20	40	—	—	—	—
ZG30NiCrMo	—	590	730	17	35	—	—	—	—
ZG35NiCrMo	—	660	830	14	30	—	—	—	—

4. 铸造高锰钢经韧化处理后的力学性能（表 12-30）

表 12-30 铸造高锰钢经韧化处理后的力学性能（JB/T 6404—1992）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	冲击吸收功 $A_{KU}/J \geq$	硬度 HBW $\leq$
ZGMn13-1	637	20	—	229
ZGMn13-2	637	20	184	
ZGMn13-3	686	25	184	
ZGMn13-4	735	35	184	
ZGMn13Cr	490	30	—	—
ZGMn13Cr2	655 ~ 1000	27 ~ 63	—	220

5. 大型耐热钢铸件的力学性能（表 12-31）

表 12-31 大型耐热钢铸件的力学性能（JB/T 6403—1992）

牌号 (原牌号)	下屈服强度 $R_{el}$ ( $R_{p0.2}$ )/(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长 率 $A$ (%)	热处理状态
ZG40Cr9Si2 (ZG4Cr9Si2)	—	550	—	950℃退火
ZG30Cr18Mn12Si2N (ZG3Cr18Mn12Si2N)	—	490	8	1100 ~ 1150℃油冷、 水冷或空冷
ZG35Cr24Ni7SiN	(340)	540	12	—
ZG20Cr26Ni5 (ZG3Cr25Ni5)	—	590	—	—
ZG30Cr20Ni10 (ZG3Cr20Ni10)	(235)	490	23	—
ZG35Cr26Ni12	(235)	490	8	—
ZG35Cr28Ni16	(235)	490	8	—
ZG40Cr25Ni20 (ZG4Cr25Ni20)	(235)	440	8	—
ZG40Cr30Ni20 (ZG4Cr30Ni20)	(245)	450	8	—
ZG35Ni24Cr18Si2	(195)	390	5	—
ZG30Ni35Cr15 (ZG3Ni35Cr15)	(195)	440	13	—
ZG45Ni35Cr26	(235)	440	5	—
ZG40Cr22Ni4N (ZG4Cr22Ni4N)	450	730	10	调质
ZG30Cr25Ni20 (ZG3Cr25Ni20)	240	510	48	调质
ZG20Cr20Mn9Ni2SiN (ZG2Cr20Mn9Ni2Si2N)	420	790	40	调质
ZG08Cr18Ni12Mo2Ti (ZG0Cr18Ni12Mo2Ti)	210	490	30	1150℃水淬

6. 铸造锚链钢的力学性能（表 12-32）

表 12-32 铸造锚链钢的力学性能（GB/T 552—1996）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	冲击吸收功 $A_{KV}$ (0℃)/J	断面收缩率 $Z$ (%)
ZG409ML2	≥490	≥22	—	—
ZG690ML3	≥690	≥17	≥59	≥35

7. 焊接结构用碳素钢铸件的力学性能（表 12-33）

表 12-33 焊接结构用碳素钢铸件的力学性能（GB/T 7659—1987）

牌 号	拉 伸 性 能				冲 击 性 能	
	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	$A_{KV}/J$	$a_{KU}$ $/(J/cm^2)$
	$\geq$				$\geq$	
ZG200-400H	200	400	25	40	30	59
ZG230-450H	230	450	22	35	25	44
ZG275-485H	275	485	20	35	22	34

12.3 不锈钢铸件的力学性能

1. 水轮机不锈钢叶片铸件的力学性能（表 12-34）

表 12-34 水轮机不锈钢叶片铸件的力学性能（JB/T 7350—2002）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	冲击吸收功 $A_{KV}/J$	硬度 HBW
ZG06Cr13Ni4Mo	$\geq 750$	$\geq 550$	$\geq 15$	$\geq 35$	$\geq 50$	$\geq 221$
ZG06Cr13Ni5Mo						
ZG06Cr13Ni6Mo						
ZG06Cr16Ni5Mo	$\geq 785$	$\geq 588$	$\geq 15$	$\geq 35$	$\geq 40$	$\geq 221$

2. 工程结构用中、高强度不锈钢铸件的力学性能（表 12-35）

表 12-35 工程结构用中、高强度不锈钢铸件的力学性能（GB/T 6967—2009）

铸 钢 牌 号		规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A(\%)$	断面收缩 率 $Z(\%)$	冲击吸收 功 $A_{KV}/J$	硬度 HBW
		$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	
ZG15Cr13		345	540	18	40	—	163 ~ 229
ZG20Cr13		390	590	16	35	—	170 ~ 235
ZG15Cr13Ni1		450	590	16	35	20	170 ~ 241
ZG10Cr13Ni1Mo		450	620	16	35	27	170 ~ 241
ZG06Cr13Ni4Mo		550	750	15	35	50	221 ~ 294
ZG06Cr13Ni5Mo		550	750	15	35	50	221 ~ 294
ZG06Cr16Ni5Mo		550	750	15	35	50	221 ~ 294
ZG04Cr13Ni4Mo	HT1 <sup>①</sup>	580	780	18	50	80	221 ~ 294
	HT2 <sup>②</sup>	830	900	12	35	35	294 ~ 350
ZG04Cr13Ni5Mo	HT1 <sup>①</sup>	580	780	18	50	80	221 ~ 294
	HT2 <sup>②</sup>	830	900	12	35	35	294 ~ 350

① 回火温度应为 600 ~ 650℃。  
② 回火温度应为 500 ~ 550℃。

## 3. 大型不锈钢铸件的力学性能 (表 12-36)

表 12-36 大型不锈钢铸件的力学性能 (JB/T 6405—2006)

牌 号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$	冲击吸收功 $A_{KV}/J \geq$	硬度 HBW
ZG15Cr13	620	450	18	30	—	$\leq 241$
ZG20Cr13	588	392	16	35	—	170 ~ 235
ZG30Cr13	690	485	15	25	—	$\leq 269$
ZG12Cr18Ni9Ti	440	195	25	32	—	—
ZG06Cr13Ni4Mo	750	550	15	35	50	$\geq 220$
ZG06Cr13Ni5Mo	750	550	15	35	50	$\geq 220$
ZG06Cr13Ni6Mo	750	550	15	35	50	$\geq 220$
ZG06Cr16Ni5Mo	785	588	15	35	40	$\geq 220$
ZG08Cr19Ni9	485	205	35	—	—	—
ZG08Cr19Ni11Mo3	520	240	25	—	—	—
ZG12Cr22Ni12	485	195	35	—	—	—
ZG20Cr25Ni20	450	195	30	—	—	—
ZG12Cr17Mn9Ni4Mo3Cu2N	588	294	25	35	—	—
ZG12Cr18Mn13Mo2CuN	588	394	30	40	—	—





第 13 章 工具钢的力学性能

13.1 碳素工具钢的力学性能

13.1.1 普通碳素工具钢的硬度（表 13-1）

表 13-1 碳素工具钢的硬度值（GB/T 1298—2008）

牌 号	交货状态		试样淬火	
	退火	退火后冷拉	淬火温度 和淬火介质	硬度 HRC ≥
	硬度 HBW ≤			
T7	187	241	800 ~ 820℃，水	62
T8			780 ~ 800℃，水	
T8Mn				
T9	192		760 ~ 780℃，水	
T10	197			
T11	207			
T12				
T13	217			

13.1.2 大型锻件用碳素工具钢的硬度（表 13-2）

表 13-2 大型锻件用碳素工具钢的硬度值（JB/T 6394—1992）

牌 号	退火状态	淬 火 状 态		
	硬度 HBW ≤	淬火温度/℃	淬火介质	硬度 HRC ≥
T7	187	800 ~ 820	水	62
T8	187	780 ~ 800	水	62
T8Mn	187	780 ~ 800	水	62
T9	192	760 ~ 780	水	62
T10	197	760 ~ 780	水	62
T11	207	760 ~ 780	水	62
T12	207	760 ~ 780	水	62
T13	217	760 ~ 780	水	62

13.1.3  手表用碳素工具钢冷轧钢带的力学性能（表 13-3）

表 13-3  手表用碳素工具钢冷轧钢带的力学性能（YB/T 5061—2007）

性能组别	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{x\,mm}(\%) \geq$
I	800 ~ 1000	—
II	700 ~ 900	
III	650 ~ 800	
IV	$\leq 680$	12

注： $A_{x\,mm}$  中  $x$  表示试样标距长度值。

13.2  合金工具钢的力学性能

13.2.1  合金工具钢的力学性能

1. 合金工具钢的硬度值（表 13-4）

表 13-4  合金工具钢的硬度值（GB/T 1299—2000）

钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
		硬度 HBW	淬火温度/℃	淬火 介质	硬度 HRC $\geq$
量具刃 具用钢	9SiCr	241 ~ 197	820 ~ 860	油	62
	8MnSi	$\leq 229$	800 ~ 820	油	60
	Cr06	241 ~ 187	780 ~ 810	水	64
	Cr2	229 ~ 179	830 ~ 860	油	62
	9Cr2	217 ~ 179	820 ~ 850	油	62
	W	229 ~ 187	800 ~ 830	水	62
耐冲击 工具 用钢	4CrW2Si	217 ~ 179	860 ~ 900	油	53
	5CrW2Si	255 ~ 207	860 ~ 900	油	55
	6CrW2Si	285 ~ 229	860 ~ 900	油	57
	6CrMnSi2Mo1V	$\leq 229$	677℃ $\pm$ 15℃ 预热, 885℃ (盐浴) 或 900℃ (炉控气氛) $\pm$ 6℃ 加热, 保温 5 ~ 15min 油冷, 180 ~ 200℃ 回火		58
	5Cr3Mn1SiMo1V		677℃ $\pm$ 15℃ 预热, 941℃ (盐浴) 或 955℃ (炉控气氛) $\pm$ 6℃ 加热, 保温 5 ~ 15min 空冷, 180 ~ 200℃ 回火		56

(续)

钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
		硬度 HBW	淬火温度/℃	淬火 介质	硬度 HRC≥
冷作模 具钢	Cr12	269 ~ 217	950 ~ 1000	油	60
	Cr12Mo1V1	≤255	820℃ ± 15℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保 温 10 ~ 20min 空冷, 200℃ ± 6℃ 回火		59
	Cr12MoV	255 ~ 207	950 ~ 1000	油	58
	Cr5Mo1V	≤255	790℃ ± 15℃ 预热, 940℃ (盐浴) 或 950℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 5 ~ 15min 空冷, 200℃ ± 6℃ 回火		60
	9Mn2V	≤229	780 ~ 810	油	62
	CrWMn	255 ~ 207	800 ~ 830	油	62
	9CrWMn	241 ~ 197	800 ~ 830	油	62
	Cr4W2MoV	≤269	960 ~ 980、 1020 ~ 1040	油	60
	6Cr4W3Mo2VNB	≤255	1100 ~ 1160	油	60
	6W6Mo5Cr4V	≤269	1180 ~ 1200	油	60
热作模 具钢	7CrSiMnMoV	≤235	淬火: 870 ~ 900 回火: 150 ± 10	油冷或空冷 空冷	60
	5CrMnMo	241 ~ 197	820 ~ 850	油	60
	5CrNiMo	241 ~ 197	830 ~ 860	油	60
	3Cr2W8V	≤255	1075 ~ 1125	油	60
	5Cr4Mo3SiMnVA1	≤255	1090 ~ 1120	油	60
	3Cr3Mo3W2V	≤255	1060 ~ 1130	油	60
	5Cr4W5Mo2V	≤269	1100 ~ 1150	油	60
	8Cr3	255 ~ 207	850 ~ 880	油	60
	4CrMnSiMoV	241 ~ 197	870 ~ 930	油	60
	4Cr3Mo3SiV	≤229	790℃ ± 15℃ 预热, 1010℃ (盐浴) 或 1020℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保 温 5 ~ 15min 空冷, 550℃ ± 6℃ 回火		60
	4Cr5MoSiV	≤235	790℃ ± 15℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保 温 5 ~ 15min 空冷, 550℃ ± 6℃ 回火		60

(续)

钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
		硬度 HBW	淬火温度/℃	淬火 介质	硬度 HRC≥
热作模 具钢	4Cr5MoSiV1	≤235	790℃ ± 15℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保 温 5 ~ 15min 空冷, 550℃ ± 6℃ 回火		60
	4Cr5W2VSi	≤229	1030 ~ 1050	油或空	60
无磁模 具钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo	—	1170 ~ 1190 固溶 650 ~ 700 时效	水 空	45
塑料模 具钢	3Cr2Mo	—	—	—	—
	3Cr2MnNiMo	—	—	—	—

2. 大型锻件用合金工具钢的硬度值 (表 13-5)

表 13-5 大型锻件用合金工具钢的硬度值 (JB/T 6393—1992)

钢号	退火或高温回火硬度 HBW	钢号	退火或高温回火硬度 HBW
9Cr2	217 ~ 207	5CrMnMo	241 ~ 179
9CrSi	241 ~ 179	5CrNiMo	241 ~ 179
8Cr3	255 ~ 207	3Cr2W8V	255 ~ 207
4CrW2Si	217 ~ 179	3Cr2W8MoV	—
5CrW2Si	255 ~ 207	4Cr5MoSiV	≤235
6CrW2Si	285 ~ 229	4Cr5MoSiV1	≤235
Cr12	269 ~ 217	4SiMnMoV	≤241
Cr12MoV	255 ~ 207	5CrSiMnMoV	≤217
9Mn2V	≤229	6SiMnV	≤229

3. 大型锻件用合金工具钢淬火试样硬度值 (表 13-6)

表 13-6 大型锻件用合金工具钢淬火试样硬度值 (JB/T 6393—1992)

钢 号	淬 火 状 态	
	淬火温度及冷却方式	硬度 HRC
9Cr2	820 ~ 850℃, 油冷	≥62
9CrSi	820 ~ 860℃, 油冷	≥62
8Cr3	850 ~ 880℃, 油冷	≥55
4CrW2Si	860 ~ 900℃, 油冷	≥53
5CrW2Si	860 ~ 900℃, 油冷	≥55

(续)

钢 号	淬 火 状 态	
	淬火温度及冷却方式	硬度 HRC
6CrW2Si	860 ~ 900℃, 油冷	≥57
Cr12	950 ~ 1000℃, 油冷	≥60
Cr12MoV	950 ~ 1000℃, 油冷	≥58
9Mn2V	780 ~ 810℃, 油冷	≥62
5CrMnMo	820 ~ 850℃, 油冷	53 ~ 58
5CrNiMo	830 ~ 860℃, 油冷	53 ~ 58
3Cr2W8V	1075 ~ 1125℃, 油冷	49 ~ 52
3Cr2W8MoV	1100 ~ 1150℃, 油冷	≥52
4Cr5MoSiV	790℃ 预热, 1000℃ 盐浴或 1010℃ 油冷, 550℃ 回火	≥60
4Cr5MoSiV1	790℃ 预热, 1000℃ 盐浴或 1010℃ 油冷, 550℃ 回火	≥60
4SiMnMoV	900 ~ 930℃, 油冷	40 ~ 46
5CrSiMnMoV	870 ~ 900℃, 油冷	38 ~ 49
6SiMnV	820 ~ 860℃, 油冷	40 ~ 46

13.2.2 高速工具钢的硬度 (表 13-7)

表 13-7 高速工具钢棒的硬度值 (GB/T 9943—2008)

序号	牌 号	交货硬度 (退火态) HBW ≤	试样热处理制度及淬、回火硬度					
			预热 温度 /℃	淬火温度/℃		淬火 介质	回火温度 /℃	硬度 HRC ≥
				盐浴炉	箱式炉			
1	W3Mo3Cr4V2	255	800 ~ 900	1180 ~ 1220	1180 ~ 1220	油 或 盐 浴	540 ~ 560	63
2	W4Mo3Cr4VSi	255		1170 ~ 1190	1170 ~ 1190		540 ~ 560	63
3	W18Cr4V	255		1250 ~ 1270	1260 ~ 1280		550 ~ 570	63
4	W2Mo8Cr4V	255		1180 ~ 1220	1180 ~ 1220		550 ~ 570	63
5	W2Mo9Cr4V2	255		1190 ~ 1210	1200 ~ 1220		540 ~ 560	64
6	W6Mo5Cr4V2	255		1200 ~ 1220	1210 ~ 1230		540 ~ 560	64
7	CW6Mo5Cr4V2	255		1190 ~ 1210	1200 ~ 1220		540 ~ 560	64
8	W6Mo6Cr4V2	262		1190 ~ 1210	1190 ~ 1210		550 ~ 570	64
9	W9Mo3Cr4V	255		1200 ~ 1220	1220 ~ 1240		540 ~ 560	64

(续)

序号	牌 号	交货硬度 (退火态) HBW ≤	试样热处理制度及淬、回火硬度					
			预热 温度 /℃	淬火温度/℃		淬火 介质	回火温度 /℃	硬度 HRC ≥
				盐浴炉	箱式炉			
10	W6Mo5Cr4V3	262	800 ~ 900	1190 ~ 1210	1200 ~ 1220	油 或 盐 浴	540 ~ 560	64
11	CW6Mo5Cr4V3	262		1180 ~ 1200	1190 ~ 1210		540 ~ 560	64
12	W6Mo5Cr4V4	269		1200 ~ 1220	1200 ~ 1220		550 ~ 570	64
13	W6Mo5Cr4V2Al	269		1200 ~ 1220	1230 ~ 1240		550 ~ 570	65
14	W12Cr4V5Co5	277		1220 ~ 1240	1230 ~ 1250		540 ~ 560	65
15	W6Mo5Cr4V2Co5	269		1190 ~ 1210	1200 ~ 1220		540 ~ 560	64
16	W6Mo5Cr4V3Co8	285		1170 ~ 1190	1170 ~ 1190		550 ~ 570	65
17	W7Mo4Cr4V2Co5	269		1180 ~ 1200	1190 ~ 1210		540 ~ 560	66
18	W2Mo9Cr4VCo8	269		1170 ~ 1190	1180 ~ 1200		540 ~ 560	66
19	W10Mo4Cr4V3Co10	285		1220 ~ 1240	1220 ~ 1240		550 ~ 570	66

13.2.3 塑料模具用钢的力学性能

1. 塑料模具用扁钢的力学性能（表 13-8）

表 13-8 塑料模具用扁钢的力学性能（YB/T 094—1997）

牌 号	推荐热处理制度	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	冲击吸收功 $A_K/J$
		≥				
SM45	820 ~ 870℃ 空冷	600	355	16	40	—
SM50	810 ~ 860℃ 空冷	630	375	14	40	—
SM55	800 ~ 850℃ 空冷	645	380	13	35	—
SM3Cr2Mo	850 ~ 880℃ 油冷 + 550 ~ 650℃ 空冷	960	800	10	35	40
SM3Cr2Ni1Mo	850 ~ 880℃ 油冷 + 550 ~ 650℃ 空冷	980	800	10	35	45
SM2Cr13	920 ~ 980℃ 油冷 + 600 ~ 750℃ 水冷	635	440	20	50	63

## 2. 塑料模具用热轧厚钢板的力学性能 (表 13-9)

表 13-9 塑料模具用热轧厚钢板的力学性能和工艺性能 (YB/T 107—1997)

牌 号	试样推荐热处理制度	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A(\%)$	冲击吸收功 (纵向) $A_{KU}/J$
		$\geq$			
SM45	850℃油冷 +560℃回火	355	600	16	35 (常温)
SM48		365	610	14	
SM50		375	630	14	
SM53		380	640	13	
SM55		385	610	13	
SM3Cr2Mo		660	960	15	45 (常温)
SM3Cr2Ni1Mo		680	980	15	

## 13.2.4 弹簧钢和工具钢冷轧钢带的力学性能 (表 13-10)

表 13-10 弹簧钢和工具钢冷轧钢带的力学性能 (YB/T 5058—2005)

牌 号	钢带厚度 /mm	退火钢带		冷硬钢带
		抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ ) $\leq$	断后伸长率 $A_{x\text{mm}}(\%) \geq$	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )
65Mn	$\leq 1.5$	635	20	735 ~ 1175
T7、T7A、T8、T8A	$> 1.5$	735	15	
T8Mn、T8MnA、T9、T9A、T10、 T10A、T11、T11A、T12、T12A、85	0.10 ~ 3.00	735	10	
T13、T13A		880	—	—
Cr06		930	—	785 ~ 1175
60Si2Mn、60Si2MnA、50CrVA		880	10	
70Si2CrA		830	8	

注： $A_{x\text{mm}}$ 中 $x$ 表示试样标距长度值。



第 14 章 结构钢的力学性能

14.1 钢种的力学性能

14.1.1 碳素结构钢的力学性能

1. 碳素结构钢的力学性能（表 14-1）

表 14-1 碳素结构钢的力学性能（GB/T 700—2006）

牌号	等级	屈服强度 $R_{eH}^{①}/(N/mm^2) \geq$						抗拉强度 <sup>②</sup> $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$					冲击试验(V形缺口)	
		厚度(或直径)/mm							厚度(或直径)/mm					温度 /°C	冲击吸收功(纵向) /J $\geq$
		$\leq 16$	$> 16 \sim 40$	$> 40 \sim 60$	$> 60 \sim 100$	$> 100 \sim 150$	$> 150 \sim 200$		$\leq 40$	$> 40 \sim 60$	$> 60 \sim 100$	$> 100 \sim 150$	$> 150 \sim 200$		
Q195	—	195	185	—	—	—	—	315 ~ 430	33	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335 ~ 450	31	30	29	27	26	—	—
	B													+20	27
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370 ~ 500	26	25	24	22	21	—	—
	B													+20	27 <sup>③</sup>
	C													0	
	D													-20	
Q275	A	275	265	255	245	225	215	410 ~ 540	22	21	20	18	17	—	—
	B													+20	27
	C													0	
	D													-20	

① Q195 的屈服强度值仅供参考，不作交货条件。

② 厚度大于 100mm 的钢材，抗拉强度下限允许降低 20N/mm<sup>2</sup>。宽带钢（包括剪切钢板）抗拉强度上限不作交货条件。

③ 厚度小于 25mm 的 Q235B 级钢材，如供方能保证冲击吸收功值合格，经需方同意可不作检验。

2. 优质碳素结构钢的力学性能（表 14-2）

表 14-2 优质碳素结构钢的力学性能 (GB/T 699—1999)

序号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	推荐热处理/℃			抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服 强度 $R_{el}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A$ (%)	断面 收缩率 $Z$ (%)	冲击 吸收功 $A_{KU2}$ /J	钢材交货状 态硬度 HBW	
			正火	淬火	回火						未热处 理钢	退火 钢
						≥						≤
1	08F	25	930	—	—	295	175	35	60	—	131	—
2	10F	25	930	—	—	315	185	33	55	—	137	—
3	15F	25	920	—	—	355	205	29	55	—	143	—
4	08	25	930	—	—	325	195	33	60	—	131	—
5	10	25	930	—	—	335	205	31	55	—	137	—
6	15	25	920	—	—	375	225	27	55	—	143	—
7	20	25	910	—	—	410	245	25	55	—	156	—
8	25	25	900	870	600	450	275	23	50	71	170	—
9	30	25	880	860	600	490	295	21	50	63	179	—
10	35	25	870	850	600	530	315	20	45	55	197	—
11	40	25	860	840	600	570	335	19	45	47	217	187
12	45	25	850	840	600	600	355	16	40	39	229	197
13	50	25	830	830	600	630	375	14	40	31	241	207
14	55	25	820	820	600	645	380	13	35	—	255	217
15	60	25	810	—	—	675	400	12	35	—	255	229
16	65	25	810	—	—	695	410	10	30	—	255	229
17	70	25	790	—	—	715	420	9	30	—	269	229
18	75	试样	—	820	480	1080	880	7	30	—	285	241
19	80	试样	—	820	480	1080	930	6	30	—	285	241
20	85	试样	—	820	480	1130	980	6	30	—	302	255
21	15Mn	25	920	—	—	410	245	26	55	—	163	—
22	20Mn	25	910	—	—	450	275	24	50	—	197	—
23	25Mn	25	900	870	600	490	295	22	50	71	207	—
24	30Mn	25	880	860	600	540	315	20	45	63	217	187
25	35Mn	25	870	850	600	560	335	18	45	55	229	197
26	40Mn	25	860	840	600	590	355	17	45	47	229	207
27	45Mn	25	850	840	600	620	375	15	40	39	241	217
28	50Mn	25	830	830	600	645	390	13	40	31	255	217
29	60Mn	25	810	—	—	695	410	11	35	—	269	229
30	65Mn	25	830	—	—	735	430	9	30	—	285	229
31	70Mn	25	790	—	—	785	450	8	30	—	285	229

14.1.2 合金结构钢的力学性能

1. 合金结构钢热处理纵向力学性能 (表 14-3)

表 14-3 合金结构钢热处理纵向力学性能 (GB/T 3077—1999)

钢组	序 号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热 处 理					抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	下屈服强 度 $R_{eL}$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}/J$	钢材退火或 高温回火供 应状态布氏 硬度 HBW ≤
				淬火		回火		冷却 剂						
				加热温度/℃		加热 温度 /℃								
				第一次 淬火	第二次 淬火									
							冷却 剂							
Mn	1	20Mn2	15	850	—	水、油	200	水、空	785	590	10	40	47	187
				880	—	水、油	440	水、空						
	2	30Mn2	25	840	—	水	500	水	785	635	12	45	63	207
	3	35Mn2	25	840	—	水	500	水	835	685	12	45	55	207
	4	40Mn2	25	840	—	水、油	540	水	885	735	12	45	55	217
	5	45Mn2	25	840	—	油	550	水、油	885	735	10	45	47	217
MnV	6	50Mn2	25	820	—	油	550	水、油	930	785	9	40	39	229
	7	20MnV	15	880	—	水、油	200	水、空	785	590	10	40	55	187
SiMn	8	27SiMn	25	920	—	水	450	水、油	980	835	12	40	39	217
	9	35SiMn	25	900	—	水	570	水、油	885	735	15	45	47	229
	10	42SiMn	25	880	—	水	590	水	885	735	15	40	47	229
SiMnMoV	11	20SiMn2MoV	试样	900	—	油	200	水、空	1380	—	10	45	55	269
	12	25SiMn2MoV	试样	900	—	油	200	水、空	1470	—	10	40	47	269
	13	37SiMn2MoV	25	870	—	水、油	650	水、空	980	835	12	50	63	269
B	14	40B	25	840	—	水	550	水	785	635	12	45	55	207
	15	45B	25	840	—	水	550	水	835	685	12	45	47	217
	16	50B	20	840	—	油	600	空	785	540	10	45	39	207

(续)

钢组	序 号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热 处 理					抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强 度 $R_{el}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}$ /J	钢材退火或 高温回火供 应状态布氏 硬度 HBW ≤
				淬火		回火								
				加热温度/℃		冷却 剂	加热 温度 /℃	冷却 剂						
				第一次 淬火	第二次 淬火									
MnB	17	40MnB	25	850	—	油	500	水、油	980	785	10	45	47	207
	18	45MnB	25	840	—	油	500	水、油	1030	835	9	40	39	217
MnMoB	19	20MnMoB	15	880	—	油	2000	油、空	1080	885	10	50	55	207
MnVB	20	15MnVB	15	860	—	油	200	水、空	885	635	10	45	55	207
	21	20MnVB	15	860	—	油	200	水、空	1080	885	10	45	55	207
	22	40MnVB	25	850	—	油	520	水、油	980	785	10	45	47	207
MnTiB	23	20MnTiB	15	860	—	油	200	水、空	1130	930	10	45	55	187
	24	25MnTiBRE	试样	860	—	油	200	水、空	1380	—	10	40	47	229
Cr	25	15Cr	15	880	780 ~ 820	水、油	200	水、空	735	490	11	45	55	179
	26	15CrA	15	880	770 ~ 820	水、油	180	油、空	685	490	12	45	55	179
	27	20Cr	15	880	780 ~ 820	水、油	200	水、空	835	540	10	40	47	179
	28	30Cr	25	860	—	油	500	水、油	885	685	11	45	47	187
	29	35Cr	25	860	—	油	500	水、油	930	735	11	45	47	207
	30	40Cr	25	850	—	油	520	水、油	980	785	9	45	47	207
	31	45Cr	25	840	—	油	520	水、油	1030	835	9	40	39	217
	32	50Cr	25	830	—	油	520	水、油	1080	930	9	40	39	229

(续)

钢组	序 号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热 处 理				抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强 度 $R_{el}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{K12}$ /J	钢材退火或 高温回火供 应状态布氏 硬度 HBW≤	
				淬火		冷却 剂	加热 温度 /℃							冷却 剂
				加热温度/℃										
				第一次 淬火	第二次 淬火									
CrSi	33	38CrSi	25	900	—	油	600	水、油	980	835	12	50	55	255
	34	12CrMo	30	900	—	空	650	空	410	265	24	60	110	179
CrMo	35	15CrMo	30	900	—	空	650	空	440	295	22	60	94	179
	36	20CrMo	15	880	—	水、油	500	水、油	885	685	12	50	78	197
	37	30CrMo	25	880	—	水、油	540	水、油	930	785	12	50	63	229
	38	30CrMoA	15	880	—	油	540	水、油	930	735	12	50	71	229
	39	35CrMo	25	850	—	油	550	水、油	980	835	12	45	63	229
CrMoV	40	42CrMo	25	850	—	油	560	水、油	1080	930	12	45	63	217
	41	12CrMoV	30	970	—	空	750	空	440	225	22	50	78	241
	42	35CrMoV	25	900	—	油	630	水、油	1080	930	10	50	71	241
	43	12Cr1MoV	30	970	—	空	750	空	490	245	22	50	71	179
	44	25Cr2MoVA	25	900	—	油	640	空	930	785	14	55	63	241
CrMoAl	45	25Cr2Mo1VA	25	1040	—	空	700	空	735	590	16	50	47	241
	46	38CrMoAl	30	940	—	水、油	640	水、油	980	835	14	50	71	229
CrV	47	40CrV	25	880	—	油	650	水、油	885	735	10	50	71	241
	48	50CrVA	25	860	—	油	500	水、油	1280	1130	10	40	—	255

(续)

钢组	序 号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热 处 理						抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强 度 $R_{eL}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}$ /J	钢材退火或 高温回火供 应状态布氏 硬度 HBW ≤	
				淬火		回火		冷却 剂	加热 温度 /℃							冷却 剂
				加热温度/℃												
				第一次 淬火	第二次 淬火											
CrMn	49	15CrMn	15	880	—	油	200	水、空	785	590	12	50	47	179		
	50	20CrMn	15	850	—	油	200	水、空	930	735	10	45	47	187		
	51	40CrMn	25	840	—	油	550	水、油	980	835	9	45	47	229		
	52	20CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	785	635	12	45	55	207		
	53	25CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	1080	885	10	40	39	217		
CrMnSi	54	30CrMnSi	25	880	—	油	520	水、油	1080	885	10	45	39	229		
	55	30CrMnSiA	25	880	—	油	540	水、油	1080	835	10	45	39	229		
	56	35CrMnSiA	试样	加热到 880℃, 于 280 ~ 310℃ 等温淬火					1620	1280	9	40	31	241		
CrMnMo	57	20CrMnMo	15	850	—	油	200	水、空	1180	885	10	45	55	217		
	58	40CrMnMo	25	850	—	油	600	水、油	980	785	10	45	63	217		
	59	20CrMnTi	15	880	870	油	200	水、空	1080	850	10	45	55	217		
CrMnTi	60	30CrMnTi	试样	880	850	油	200	水、空	1470	—	9	40	47	229		
	61	20CrNi	25	850	—	水、油	460	水、油	785	590	10	50	63	197		
CrNi	62	40CrNi	25	820	—	油	500	水、油	980	785	10	45	55	241		

(续)

钢组	序 号	牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热 处 理					抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强 度 $R_{eL}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}$ /J	钢材退火或 高温回火供 应状态布氏 硬度 HBW ≤
				淬火		冷却 剂	回火							
				加热温度/℃			加热 温度 /℃	冷却 剂						
				第一次 淬火	第二次 淬火									
CrNi	63	45CrNi	25	820	—	油	530	水、油	980	785	10	45	55	255
	64	50CrNi	25	820	—	油	500	水、油	1080	835	8	40	39	255
	65	12CrNi2	15	860	780	水、油	200	水、空	785	590	12	50	63	207
	66	12CrNi3	15	860	780	油	200	水、空	930	685	11	50	71	217
	67	20CrNi3	25	830	—	水、油	480	水、油	930	735	11	55	78	241
	68	30CrNi3	25	820	—	油	500	水、油	980	785	9	45	63	241
	69	37CrNi3	25	820	—	油	500	水、油	1130	980	10	50	47	269
70	12Cr2Ni4	15	860	780	油	200	水、空	1080	835	10	50	71	269	
71	20Cr2Ni4	15	880	780	油	200	水、空	1180	1080	10	45	63	269	
CrNiMo	72	20CrNiMo	15	850	—	油	200	空	980	785	9	40	47	197
	73	40CrNiMoA	25	850	—	油	600	水、油	980	835	12	55	78	269
CrMnNiMo	74	18CrMnNiMoA	15	830	—	油	200	空	1180	885	10	45	71	269
CrNiMoV	75	45CrNiMoVA	试样	860	—	油	460	油	1470	1330	7	35	31	269
CrNiW	76	18Cr2Ni4WA	15	950	850	空	200	水、空	1180	835	10	45	78	269
	77	25Cr2Ni4WA	25	850	—	油	550	水、油	1080	930	11	45	71	269

注：1. 表中所列热处理温度允许调整范围：淬火 ± 15℃，低温回火 ± 20℃，高温回火 ± 50℃。  
2. 硼钢在淬火前可先经正火，正火温度应不高于其淬火温度，铬锰钛钢第一次淬火可用正火代替。

2. 低合金高强度结构钢的拉伸性能 (表 14-4)



表 14-4 低合金高强度结构钢的拉伸性能 (GB/T 1591—2008)

牌 号		拉 伸 试 验																								
		以下公称厚度(直径或边长)的下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$										以下公称厚度(直径或边长)的抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$										以下公称厚度(直径或边长)的断后伸长率 $A(\%)$				
		$\leq 16$	$>16 \sim 40$	$>40 \sim 63$	$>63 \sim 80$	$>80 \sim 100$	$>100 \sim 150$	$>150 \sim 200$	$>200 \sim 250$	$>250 \sim 400$	$\leq 40$	$>40 \sim 63$	$>63 \sim 80$	$>80 \sim 100$	$>100 \sim 150$	$>150 \sim 250$	$>250 \sim 400$	$\leq 40$	$>40 \sim 63$	$>63 \sim 100$	$>100 \sim 150$	$>150 \sim 250$	$>250 \sim 400$			
Q345	A																									
	B																									
	C	$\geq 345$	$\geq 335$	$\geq 325$	$\geq 315$	$\geq 305$	$\geq 285$	$\geq 275$	$\geq 265$		470 ~ 630	470 ~ 630	470 ~ 630	450 ~ 600	450 ~ 600		$\geq 20$	$\geq 19$	$\geq 18$	$\geq 17$						
	D																									
	E								$\geq 265$													$\geq 17$				
Q390	A																									
	B																									
	C	$\geq 390$	$\geq 370$	$\geq 350$	$\geq 330$	$\geq 330$	$\geq 310$				490 ~ 650	490 ~ 650	490 ~ 650	470 ~ 620	470 ~ 620		$\geq 20$	$\geq 19$	$\geq 18$							
	D																									
	E																									
Q420	A																									
	B																									
	C	$\geq 420$	$\geq 400$	$\geq 380$	$\geq 360$	$\geq 360$	$\geq 340$				520 ~ 680	520 ~ 680	520 ~ 680	500 ~ 650	500 ~ 650		$\geq 19$	$\geq 18$	$\geq 18$							
	D																									
	E																									
Q460	C	$\geq 460$	$\geq 440$	$\geq 420$	$\geq 400$	$\geq 400$	$\geq 380$				550 ~ 720	550 ~ 720	550 ~ 720	530 ~ 700	530 ~ 700		$\geq 17$	$\geq 16$	$\geq 16$							
	D																									
	E																									
	C	$\geq 500$	$\geq 480$	$\geq 470$	$\geq 450$	$\geq 440$					610 ~ 770	600 ~ 760	540 ~ 730				$\geq 17$	$\geq 17$								
	D																									
Q500	C	$\geq 550$	$\geq 530$	$\geq 520$	$\geq 500$	$\geq 490$					670 ~ 830	620 ~ 810	590 ~ 780				$\geq 16$	$\geq 16$								
	D																									
	E																									
	C	$\geq 620$	$\geq 600$	$\geq 590$	$\geq 570$						710 ~ 880	690 ~ 880						$\geq 15$	$\geq 15$							
	D																									
Q620	C	$\geq 690$	$\geq 670$	$\geq 660$	$\geq 640$						770 ~ 940	750 ~ 920						$\geq 14$	$\geq 14$							
	D																									
	E																									
	C	$\geq 770$	$\geq 750$	$\geq 730$	$\geq 730$	$\geq 730$	$\geq 730$	$\geq 730$	$\geq 730$	$\geq 730$								$\geq 14$	$\geq 14$							
	D																									
Q690	C	$\geq 940$	$\geq 920$	$\geq 900$	$\geq 900$	$\geq 900$	$\geq 900$	$\geq 900$	$\geq 900$	$\geq 900$								$\geq 14$	$\geq 14$							
	D																									
	E																									
	C	$\geq 1080$	$\geq 1060$	$\geq 1040$	$\geq 1020$	$\geq 1020$	$\geq 1000$	$\geq 1000$	$\geq 1000$	$\geq 1000$								$\geq 14$	$\geq 14$							
	D																									

注: 1. 当屈服不明显时, 可测量  $R_{p0.2}$  代替下屈服强度。  
2. 宽度不小于 600mm 扁平材, 拉伸试验取纵向试样; 宽度小于 600mm 的扁平材、型材及棒材取纵向试样, 断后伸长率最小值相应提高 1% (绝对值)。  
3. 厚度 > 250 ~ 400mm 的数值适用于扁平材。

14.1.3 易切削结构钢的力学性能

1. 热轧状态硫系易切削钢条钢和盘条的力学性能（表 14-5）

表 14-5 热轧状态硫系易切削钢条钢和盘条的力学性能（GB/T 8731—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
Y08	360 ~ 570	25	40
Y12	390 ~ 540	22	36
Y15	390 ~ 540	22	36
Y20	450 ~ 600	20	30
Y30	510 ~ 655	15	25
Y35	510 ~ 655	14	22
Y45	560 ~ 800	12	20
Y08MnS	350 ~ 500	25	40
Y15Mn	390 ~ 540	22	36
Y35Mn	530 ~ 790	16	22
Y40Mn	590 ~ 850	14	20
Y45Mn	610 ~ 900	12	20
Y45MnS	610 ~ 900	12	20

2. 热轧状态铅系易切削钢条钢和盘条的力学性能（表 14-6）

表 14-6 热轧状态铅系易切削钢条钢和盘条的力学性能（GB/T 8731—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
Y08Pb	360 ~ 570	25	40
Y12Pb	360 ~ 570	22	36
Y15Pb	390 ~ 540	22	36
Y45MnSPb	610 ~ 900	12	20

3. 热轧状态锡系易切削钢条钢和盘条的力学性能（表 14-7）

表 14-7 热轧状态锡系易切削钢条钢和盘条的力学性能（GB/T 8731—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
Y08Sn	350 ~ 500	25	40
Y15Sn	390 ~ 540	22	36
Y45Sn	600 ~ 745	12	26
Y45MnSn	610 ~ 850	12	26

## 4. 热轧状态钙系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (表 14-8)

表 14-8 热轧状态钙系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (GB/T 8731—2008)

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
Y45Ca	600 ~ 745	12	26

## 5. 经热处理毛坯制成的 Y45Ca 试样钢的力学性能 (表 14-9)

表 14-9 经热处理毛坯制成的 Y45Ca 试样钢的力学性能 (GB/T 8731—2008)

牌号	下屈服强度 $R_{eL}$ $/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ $(\%)$	断面收缩率 $Z$ $(\%)$	冲击吸收能量 $KV_2/J$
	$\geq$				
Y45Ca	355	600	16	40	39

## 6. 冷拉状态硫系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (表 14-10)

表 14-10 冷拉状态硫系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (GB/T 8731—2008)

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	硬度 HBW
	钢材公称尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30	> 30		
Y08	480 ~ 810	460 ~ 710	360 ~ 710	7 0	140 ~ 217
Y12	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7 0	152 ~ 217
Y15	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7 0	152 ~ 217
Y20	570 ~ 785	530 ~ 745	510 ~ 705	7 0	167 ~ 217
Y30	600 ~ 825	560 ~ 765	540 ~ 735	6 0	174 ~ 223
Y35	625 ~ 845	590 ~ 785	570 ~ 765	6 0	176 ~ 229
Y45	695 ~ 980	655 ~ 880	580 ~ 880	6 0	196 ~ 255
Y08MnS	480 ~ 810	460 ~ 710	360 ~ 710	7.0	140 ~ 217
Y15Mn	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7 0	152 ~ 217
Y45Mn	695 ~ 980	655 ~ 880	580 ~ 880	6 0	196 ~ 255
Y45MnS	695 ~ 980	655 ~ 880	580 ~ 880	6 0	196 ~ 255

## 7. 冷拉状态铅系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (表 14-11)

表 14-11 冷拉状态铅系易切削钢条钢和盘条的力学性能 (GB/T 8731—2008)

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后伸长率 A (%) ≥	硬度 HBW
	钢材公称尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30	> 30		
Y08Pb	480 ~ 810	460 ~ 710	360 ~ 710	7 0	140 ~ 217
Y12Pb	480 ~ 810	460 ~ 710	360 ~ 710	7 0	140 ~ 217
Y15Pb	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7 0	152 ~ 217
Y45MnSPb	695 ~ 980	655 ~ 880	580 ~ 880	6 0	196 ~ 255

8. 冷拉状态锡系易切削钢条钢和盘条的力学性能（表 14-12）

表 14-12 冷拉状态锡系易切削钢条钢和盘条的力学性能（GB/T 8731—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	硬度 HBW
	钢材公称尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30	> 30		
Y08Sn	480 ~ 705	460 ~ 685	440 ~ 635	7.5	140 ~ 200
Y15Sn	530 ~ 755	510 ~ 735	490 ~ 685	7.0	152 ~ 217
Y45Sn	695 ~ 920	655 ~ 855	635 ~ 835	6.0	196 ~ 255
Y45MnSn	695 ~ 920	655 ~ 855	635 ~ 835	6.0	196 ~ 255

9. 冷拉状态钙系易切削钢条钢和盘条的力学性能（表 14-13）

表 14-13 冷拉状态钙系易切削钢条钢和盘条的力学性能（GB/T 8731—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	硬度 HBW
	钢材公称尺寸/mm				
	8 ~ 20	> 20 ~ 30	> 30		
Y45Ca	695 ~ 920	655 ~ 855	635 ~ 835	6.0	196 ~ 255

10. Y40Mn 冷拉条钢高温回火状态的力学性能（表 14-14）

表 14-14 Y40Mn 冷拉条钢高温回火状态的力学性能（GB/T 8731—2008）

抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
590 ~ 785	$\geq 17$	179 ~ 229

11. 直接切削加工用非调质机械结构钢力学性能（表 14-15）

表 14-15 直接切削加工用非调质机械结构钢力学性能（GB/T 15712—2008）

牌号	钢材直径或 边长/mm	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{el.}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)	断面收缩率 $Z$ (%)	冲击吸收能量 $KU_2/J$
F35VS	$\leq 40$	$\geq 590$	$\geq 390$	$\geq 18$	$\geq 40$	$\geq 47$
F40VS	$\leq 40$	$\geq 640$	$\geq 420$	$\geq 16$	$\geq 35$	$\geq 37$
F45VS	$\leq 40$	$\geq 685$	$\geq 440$	$\geq 15$	$\geq 30$	$\geq 35$
F30MnVS	$\leq 60$	$\geq 700$	$\geq 450$	$\geq 14$	$\geq 30$	实测
F35MnVS	$\leq 40$	$\geq 735$	$\geq 460$	$\geq 17$	$\geq 35$	$\geq 37$
	40 ~ 60	$\geq 710$	$\geq 440$	$\geq 15$	$\geq 33$	$\geq 35$
F38MnVS	$\leq 60$	$\geq 800$	$\geq 520$	$\geq 12$	$\geq 25$	实测
F40MnVS	$\leq 40$	$\geq 785$	$\geq 490$	$\geq 15$	$\geq 33$	$\geq 32$
	40 ~ 60	$\geq 760$	$\geq 470$	$\geq 13$	$\geq 30$	$\geq 28$
F45MnVS	$\leq 40$	$\geq 835$	$\geq 510$	$\geq 13$	$\geq 28$	$\geq 28$
	40 ~ 60	$\geq 810$	$\geq 490$	$\geq 12$	$\geq 28$	$\geq 25$
F49MnVS	$\leq 60$	$\geq 780$	$\geq 450$	$\geq 8$	$\geq 20$	实测

## 14.2 专用结构钢的力学性能

### 14.2.1 冷拉、冷镦和冷挤结构钢的力学性能

#### 1. 优质结构钢冷拉钢材的交货状态硬度 (表 14-16)

表 14-16 优质结构钢冷拉钢材的交货状态硬度 (GB/T 3078—2008)

序号	牌 号	交货状态硬度 HBW ≤		序号	牌 号	交货状态硬度 HBW ≤	
		冷拉、冷拉磨光	退火、光亮退火、高温回火或正火后回火			冷拉、冷拉磨光	退火、光亮退火、高温回火或正火后回火
1	10	229	179	26	45Mn2	269	229
2	15	229	179	27	50Mn2	285	229
3	20	229	179	28	27SiMn	255	217
4	25	229	179	29	35SiMn	269	229
5	30	229	179	30	42SiMn	—	241
6	35	241	187	31	20MnV	229	187
7	40	241	207	32	40B	241	207
8	45	255	229	33	45B	255	229
9	50	255	229	34	50B	255	229
10	55	269	241	35	40MnB	269	217
11	60	269	241	36	45MnB	269	229
12	65	—	255	37	40MnVB	269	217
13	15Mn	207	163	38	20SiMnVB	269	217
14	20Mn	229	187	39	20CrV	255	217
15	25Mn	241	197	40	40CrVA	269	229
16	30Mn	241	197	41	45CrVA	302	255
17	35Mn	255	207	42	38CrSi	269	255
18	40Mn	269	217	43	20CrMnSiA	255	217
19	45Mn	269	229	44	25CrMnSiA	269	229
20	50Mn	269	229	45	30CrMnSiA	269	229
21	60Mn	—	255	46	35CrMnSiA	285	241
22	65Mn	—	269	47	20CrMnTi	255	207
23	20Mn2	241	197	48	15CrMo	229	187
24	35Mn2	255	207	49	20CrMo	241	197
25	40Mn2	269	217	50	30CrMo	269	229

(续)

序号	牌 号	交货状态硬度 HBW ≤		序号	牌 号	交货状态硬度 HBW ≤	
		冷拉、冷拉磨光	退火、光亮退火、高温回火或正火后回火			冷拉、冷拉磨光	退火、光亮退火、高温回火或正火后回火
51	35CrMo	269	241	64	40CrNi	—	255
52	42CrMo	285	255	65	45CrNi	—	269
53	20CrMnMo	269	229	66	12CrNi2A	269	217
54	40CrMnMo	269	241	67	12CrNi3A	269	229
55	35CrMoVA	285	255	68	20CrNi3A	269	241
56	38CrMoAlA	269	229	69	30CrNi3(A)	—	255
57	15CrA	229	179	70	37CrNi3A	—	269
58	20Cr	229	179	71	12Cr2Ni4A	—	255
59	30Cr	241	187	72	20Cr2Ni4A	—	269
60	35Cr	269	217	73	40CrNiMoA	—	269
61	40Cr	269	217	74	45CrNiMoVA	—	269
62	45Cr	269	229	75	18Cr2Ni4WA	—	269
63	20CrNi	255	207	76	25Cr2Ni4WA	—	269

2. 优质结构钢冷拉钢材的交货状态硬度（表 14-17）

表 14-17 优质结构钢冷拉钢材的交货状态硬度（GB/T 3078—2008）

序号	牌 号	冷 拉			退 火		
		抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
		≥			≥		
1	10	440	8	50	295	26	55
2	15	470	8	45	345	28	55
3	20	510	7.5	40	390	21	50
4	25	540	7	40	410	19	50
5	30	560	7	35	440	17	45
6	35	590	6.5	35	470	15	45
7	40	610	6	35	510	14	40
8	45	635	6	30	540	13	40
9	50	655	6	30	560	12	40
10	15Mn	490	7.5	40	390	21	50
11	50Mn	685	5.5	30	590	10	35
12	50Mn2	735	5	25	635	9	30

3. 非热处理型冷镦和冷挤压用钢的力学性能（表 14-18）

表 14-18 非热处理型冷镦和冷挤压用钢的力学性能（GB/T 6478—2001）

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \leq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$	牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \leq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
ML04Al	440	60	ML15	530	50
ML08Al	470	60	ML20Al	580	45
ML10Al	490	55	ML20	580	45
ML15Al	530	50			

4. 退火状态冷镦和冷挤压用钢的力学性能（表 14-19）

表 14-19 退火状态冷镦和冷挤压用钢的力学性能（GB/T 6478—2001）

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \leq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$	牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \leq$	断面收缩率 $Z(\%) \geq$
ML10Al	450	65	ML37Cr	600	60
ML15Al	470	64	ML40Cr	620	58
ML15	470	64	ML20B	500	64
ML20Al	490	63	ML28B	530	62
ML20	490	63	ML35B	570	62
ML20Cr	560	60	ML20MnB	520	62
ML25Mn	540	60	ML35MnB	600	60
ML30Mn	550	59	ML37CrB	600	60
ML35Mn	560	58			

注：钢材直径不大于 12mm 时，断面收缩率可降低 2%。

5. 表面硬化型及调质型冷镦和冷挤压用钢的硬度（表 14-20）

表 14-20 表面硬化型及调质型冷镦和冷挤压用钢的硬度（GB/T 6478—2001）

牌 号	淬火温度/℃	硬度 HRC	牌 号	淬火温度/℃	硬度 HRC
ML20Cr	900 ± 5	23 ~ 38	ML15MnB	880 ± 5	≥ 28
ML37Cr	850 ± 5	25 ~ 43	ML20MnB	880 ± 5	20 ~ 41
ML40Cr	850 ± 5	41 ~ 58	ML35MnB	850 ± 5	36 ~ 55
ML35Mn	870 ± 5	≤ 28	ML15MnVB	880 ± 5	≥ 30
ML20B	880 ± 5	≤ 37	ML20MnVB	880 ± 5	≥ 32
ML28B	850 ± 5	22 ~ 44	ML37CrB	850 ± 5	30 ~ 54
ML35B	850 ± 5	24 ~ 52			



14.2.2 汽轮机叶片用结构钢的力学性能

1. 汽轮机叶片用钢经退火或高温回火后的硬度（表 14-21）

表 14-21 汽轮机叶片用钢经退火或高温回火后的硬度(GB/T 8732—2004)

序号	牌 号	推荐的退火制度	推荐的高温回火制度	硬度 HBW10/3000 ≤
1	1Cr13	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	200
2	2Cr13	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	223
3	1Cr12Mo	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	255
4	1Cr11MoV	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	200
5	1Cr12W1MoV	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	223
6	2Cr12MoV	880 ~ 930℃ 缓冷	750 ~ 770℃ 快冷	255
7	2Cr11NiMoNbVN	800 ~ 900℃ 缓冷	700 ~ 770℃ 快冷	255
8	2Cr12NiMo1W1V	860 ~ 930℃ 缓冷	750 ~ 770℃ 快冷	255
9	0Cr17Ni4Cu4Nb	740 ~ 850℃ 缓冷	660 ~ 680℃ 快冷	361

2. 汽轮机叶片用钢热处理制度及力学性能（表 14-22）

表 14-22 汽轮机叶片用钢热处理制度及力学性能（GB/T 8732—2004）

序号	牌 号	热处理		力学性能					
		淬火温度 /℃	回火温度 /℃	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KV}$ /J	硬度 HBW
				≥					
1	1Cr13	980 ~ 1040 (油冷)	660 ~ 770 (空冷)	440	620	20	60	35	187 ~ 229
2	2Cr13	950 ~ 1020 (空冷、 油冷)	660 ~ 770 (油冷、水 冷、空冷)	490	665	16	50	27	207 ~ 241
3	1Cr12Mo	950 ~ 1000 (油冷)	650 ~ 710 (空冷)	550	685	18	60	78	217 ~ 248
4	1Cr11MoV	1000 ~ 1050 (空冷、油冷)	700 ~ 750 (空冷)	490	685	16	56	27	217 ~ 248

(续)

序号	牌 号	热处理		力学性能					
		淬火温度 /℃	回火温度 /℃	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KV}/J$	硬度 HBW
				≥					
5	1Cr12W1MoV	1000 ~ 1050 (油冷)	680 ~ 740 (空冷)	590	735	15	45	27	241 ~ 285
6	2Cr11NiMoNbVN	≥1090 (油冷)	≥640 (空冷)	760	930	12	32	20	277 ~ 331
7	2Cr12NiMo1W1V	980 ~ 1040 (油冷)	650 ~ 750 (空冷)	760	930	12	32	11	277 ~ 311

3. 2Cr12MoW 热处理制度及力学性能 (表 14-23)

表 14-23 2Cr12MoW 热处理制度及力学性能 (GB/T 8732—2004)

牌 号	组别	热处理		力学性能					硬度 HBW
		淬火温度 /℃	回火温度 /℃	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 $A_{KV}/J$	
				≥					
2Cr12MoV	I	1020 ~ 1070 (油冷)	≥650 (空冷)	700	900 ~ 1050	13	35	20	277 ~ 311
	II	1020 ~ 1050 (油冷)	700 ~ 750 (空冷)	590 ~ 735	≤930	15	50	27	241 ~ 285

4. 0Cr17Ni4Cu4Nb 的力学性能 (表 14-24)

表 14-24 0Cr17Ni4Cu4Nb 的力学性能 (GB/T 8732—2004)

牌 号	类别	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	硬度 HBW
				≥		
0Cr17Ni4Cu4Nb	I	590 ~ 755	≥890	16	55	262 ~ 302
	II	890 ~ 980	950 ~ 1020	16	55	293 ~ 321
	III	755 ~ 890	890 ~ 1030	16	55	277 ~ 311

14.2.3 矿用高强度圆环链用钢的力学性能 (表 14-25)

表 14-25 矿用高强度圆环链用钢的力学性能 (GB/T 10560—2008)

牌 号	试样 毛坯 尺寸 /mm	热处理 <sup>①</sup>				力 学 性 能					冷弯试验 180°	硬 度 <sup>③</sup> HBW	
		淬 温 度 /°C	淬 火 介 质	回 温 度 /°C	回 介 质	下屈服 强度 $R_{eL}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	冲击吸 收功 <sup>②</sup> $A_{KU}$ /J		退 火 状 态	热 轧 状 态
						≥					≤		
20Mn2A	15	850	水、油	200	水、空	785	590	10	40	47	—	—	
		880	水、油	440	水、空								
20MnV	15	880	水	300	水、空	885	1080	9	—	—	—	—	
				370		10							
25MnV	15	880	水	370	水、空	930	1130	9	—	—	—	—	
25MnVB	15	880	水	370	水、空	930	1130	9	—	—	—	—	
25MnSiMoVA	15	900	水	350	水、空	1080	1275	9	—	—	217	260	
25MnSiNiMoA	15	900	水	300	水、空	1175	1470	10	50	35	207	260	
20NiCrMoA	15	880	水	430	水、油	980	1180	10	50	40	220	260	
23MnNiCrMoA	15	880	水	430	水、油	980	1180	10	50	40	220	260	
23MnNiMoCrA	15	880	水	430	水、油	980	1180	10	50	40	220	260	

注：表中  $d$ —弯心直径， $a$ —钢材直径。  
① 表中热处理温度允许调整范围：淬火  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ，回火  $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 。  
② 20NiCrMoA、23MnNiCrMoA、23MnNiMoCrA 冲击试验采用 V 形切口试样。  
③ 经供需双方协商，供货时硬度指标可不作为参考依据。

## 14.2.4 重型机械用弹簧钢的力学性能

### 1. 重型机械用弹簧钢的力学性能 (表 14-26)

表 14-26 重型机械用弹簧钢的力学性能 (JB/T 6399—1992)

序号	牌 号	热 处 理		力 学 性 能				
		淬火温度 /℃	回火温度 /℃	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率(%)		断面收缩率 $Z$ (%) ≥
						$A$ ≥	$A_{11.3}$ ≥	
1	65	840(油冷)	500	784	980		9	35
2	70	830(油冷)	480	833	1029		8	30
3	65Mn	830(油冷)	540	784	980		8	30
4	60Si2Mn	870(油冷)	480	1176	1274		5	25
5	60Si2MnA	870(油冷)	440	1372	1568		5	20
6	60Si2CrA	870(油冷)	420	1568	1764	6		20
7	60Si2CrVA	850(油冷)	410	170	190	6		20
8	50CrVA	850(油冷)	500	1127	1274	10		20

注：热处理温度允许偏差：淬火温度  $\pm 20^\circ\text{C}$ ，回火温度  $\pm 50^\circ\text{C}$ 。

### 2. 重型机械用弹簧钢的交货状态及硬度 (表 14-27)

表 14-27 重型机械用弹簧钢的交货状态及硬度 (JB/T 6399—1992)

牌 号	交 货 状 态	硬度 HBW ≤
65、70	不热处理	285
65Mn		302
60Si2Mn、60Si2MnA		302
50CrVA		321
60Si2CrA	热处理	321
60Si2CrVA		321

## 14.2.5 桥梁及船体用结构钢的力学性能

### 1. 桥梁用结构钢的力学性能 (表 14-28)

表 14-28 桥梁用结构钢的力学性能 (GB/T 714—2008)

牌号	质量等级	拉伸试验				冲击试验	
		下屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}/(N/mm^2)$		抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	试验温度 $/^{\circ}C$	冲击吸收能量 $KV_2/J$
		厚度/mm					
		$\leq 50$	50 ~ 100				
		$\geq$					$\geq$
Q235q	C	235	225	400	26	0	34
	D					-20	
	E					-40	
Q345q <sup>②</sup>	C	345	335	490	20	0	47
	D					-20	
	E					-40	
Q370q <sup>②</sup>	C	370	360	510	20	0	47
	D					-20	
	E					-40	
Q420q <sup>②</sup>	C	420	410	540	19	0	47
	D					-20	
	E					-40	
Q460q	C	460	450	570	17	0	47
	D					-20	
	E					-40	

① 当屈服不明显时, 可用  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eL}$ 。  
② 厚度不大于 16mm 的钢材, 断后伸长率提高 1% (绝对值)。

2. 桥梁推荐用结构钢的力学性能 (表 14-29)

表 14-29 桥梁推荐用结构钢的力学性能 (GB/T 714—2008)

牌号	质量等级	拉伸试验				冲击试验	
		下屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}/(N/mm^2)$		抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	试验温度 $/^{\circ}C$	冲击吸收能量 $KV_2/J$
		厚度/mm					
		$\leq 50$	50 ~ 100				
		$\geq$					$\geq$
Q500q	D	500	480	600	16	-20	47
	E					-40	
Q550q	D	550	530	660	16	-20	47
	E					-40	
Q620q	D	620	580	720	15	-20	47
	E					-40	
Q690q	D	690	650	770	14	-20	47
	E					-40	

① 当屈服不明显时, 可用  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eL}$ 。

3. 船体用结构钢的力学性能（表 14-30）

表 14-30 船体用结构钢的力学性能（GB 712—2000）

钢材等级	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长 率 A (%) ≥	试验温度 /℃	冲击吸收功 $A_{KV}$ /J ≥					
					厚度/mm					
					≤50		>50 ~ 70		>70 ~ 100	
					纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
A	235	400 ~ 520	22	20	—	—	34	24	41	27
B				0	27	20				
D				-20						
E				-40						
A32	315	440 ~ 570	22	0	31	22	38	26	46	31
D32				-20						
E32				-40						
F32				-60			—			
A36	355	490 ~ 630	21	0	34	24	41	27	50	34
D36				-20						
E36				-40						
F36				-60			—			
A40	390	510 ~ 660	20	0	41	27				
D40				-20						
E40				-40						
F40				-60						

4. 厚度小于 12mm 船体用结构钢的最小平均冲击吸收功（表 14-31）

表 14-31 厚度小于 12mm 船体用结构钢的最小平均冲击吸收功（GB 712—2000）

钢材等级	小试样尺寸 /mm	冲击吸收功/J ≥		钢材等级	小试样尺寸 /mm	冲击吸收功/J ≥	
		纵向	横向			纵向	横向
A B	10 × 7.5	22	17	A36 D36	10 × 7.5	28	20
D E	10 × 5.0	18	13	E36 F36	10 × 5.0	23	16
A32 D32	10 × 7.5	26	18	A40 D40	10 × 7.5	34	23
E32 F32	10 × 5.0	21	15	E40 F40	10 × 5.0	27	18

14.2.6 铁塔用热轧角钢的力学性能（表 14-32）

表 14-32 铁塔用热轧角钢的力学性能（YB/T 4163—2007）

牌号	质量等级	拉伸试验			断后伸 长率 $A$ (%)	冲击试验 $A_{KV}/J$				180°弯曲试验 $d$ —弯心直径 (mm) $a$ —试样厚度 (mm)	
		上屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eH}$ / (N/mm <sup>2</sup> )		抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )							
		厚度/mm									
		≤16	>16 ~ 35			+20℃	0℃	-20℃	-40℃	厚度/mm	
		≥				≥				≤16	>16 ~ 35
Q235T	A	235	225	370 ~ 500	26	27	27	27		$d = a$	
	B				26						
	C				26						
	D				26						
Q275T	A	275	265	410 ~ 540	26	27	27	27		$d = a$	
	B				26						
	C				26						
	D				26						
Q345T	A	345	325	470 ~ 630	21	34	34	34		$d = 2a$	$d = 3a$
	B				21						
	C				22						
	D				22						
Q420T	A	420	400	520 ~ 680	18	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
	B				18						
	C				19						
	D				19						
	E				19						
Q460T	A	460	440	550 ~ 720	17	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
	B				17						
	C				17						
	D				17						
	E				17						

① 当屈服不明显时，可用  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eL}$ 。

14.2.7 铁路车辆用结构钢的力学性能

1. 铁路机车、车辆车轴用钢的力学性能（表 14-33）



表 14-33 铁路机车、车辆车轴用钢的力学性能 (GB 5068—1999)

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)	冲击吸收功 $A_{KU}$ (常温)/J	
			4 个试样平均值	其中试样最小值
			$\geq$	
LZ40	550 ~ 570	22	47.0	31.0
LZ45	> 570 ~ 600	21	39.0	27.0
	> 600	20	31.0	23.0
JZ40	570 ~ 590	21	39.0	27.0
JZ45	> 590 ~ 620	20	31.0	23.0
	> 620	19	27.0	23.0

## 2. 铁路货车滚动轴承用冷拉轴承钢退火状态的布氏硬度值 (表 14-34)

表 14-34 铁路货车滚动轴承用冷拉轴承钢退火状态的布氏硬度值 (YB 4101—1998)

组 别	硬度 HBW
一组	179 ~ 207
二组	201 ~ 235

## 3. 铁路货车滚动轴承用渗碳钢钢棒的纵向力学性能 (表 14-35)

表 14-35 铁路货车滚动轴承用渗碳钢钢棒的纵向力学性能 (YB 4100—1998)

试样毛坯 直径/mm	热 处 理		力学性能 $\geq$			
	淬火	回火	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A$ (%)	断面收缩 率 $Z$ (%)	冲击吸收 功 $A_{KV}/J$
25	880℃ ± 20℃ 油冷 800℃ ± 20℃ 油冷	170 ~ 200℃ 空冷	980	13	45	63

## 14.2.8 轴承钢的力学性能

## 1. 高碳铬轴承钢退火状态的硬度 (表 14-36)

表 14-36 高碳铬轴承钢退火状态的硬度 (GB/T 18254—2002)

牌 号	硬度 HBW	牌 号	硬度 HBW
GCr4	179 ~ 207	GCr15SiMo	179 ~ 217
GCr15	179 ~ 207	GCr18Mo	179 ~ 207
GCr15SiMn	179 ~ 217		

2. 渗碳轴承钢材的纵向力学性能（表 14-37）

表 14-37 渗碳轴承钢材的纵向力学性能（GB/T 3203—1982）

牌 号	试样毛 坯直径 /mm	热 处 理					力学性能			
		淬 火			回 火		抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长 率 A (%)	断面 收缩 率 Z (%)	冲击韧度 $a_K$ / (J/cm <sup>2</sup> )
		温度/℃		冷却剂	温度/℃	冷却剂				
		第一次 淬 火	第二次 淬 火							
		≤								
G20CrNiMo	15	880 ± 20	790 ± 20	油	150 ~ 200	空	1177	9	45	80
G20CrNi2Mo	25	880 ± 20	800 ± 20	油	150 ~ 200	空	981	13	45	80
G20Cr2Ni4	15	870 ± 20	790 ± 20	油	150 ~ 200	空	1177	10	45	80
G10CrNi3Mo	15	880 ± 20	790 ± 20	油	180 ~ 200	空	1079	9	45	80
G20Cr2Mn2Mo	15	880 ± 20	810 ± 20	油	180 ~ 200	空	1275	9	40	70

14.2.9 弹簧钢的力学性能

1. 弹簧钢的热处理制度和力学性能（表 14-38）

表 14-38 弹簧钢的热处理制度和力学性能（GB/T 1222—2007）

序号	牌号	热处理 <sup>①</sup>			力学性能 ≥				
		淬火温度 /℃	淬火 介质	回火温度 /℃	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率		断面收缩 率 Z (%)
							A (%)	$A_{11.3}$ (%)	
1	65	840	油	500	980	785		9	35
2	70	830	油	480	1030	835		8	30
3	85	820	油	480	1130	980		6	30
4	65Mn	830	油	540	980	785		8	30
5	55SiMnVB	860	油	460	1375	1225		5	30
6	60Si2Mn	870	油	480	1275	1180		5	25
7	60Si2MnA	870	油	440	1570	1375		5	20
8	60Si2CrA	870	油	420	1765	1570	6		20
9	60Si2CrVA	850	油	410	1860	1665	6		20
10	55SiCrA	860	油	450	1450 ~ 1750	1300( $R_{p0.2}$ )	6		25
11	55CrMnA	830 ~ 860	油	460 ~ 510	1225	1080( $R_{p0.2}$ )	9		20
12	60CrMnA	830 ~ 860	油	460 ~ 520	1225	1080( $R_{p0.2}$ )	9		20
13	50CrVA	850	油	500	1275	1130	10		40
14	60CrMnBA	830 ~ 860	油	460 ~ 520	1225	1080( $R_{p0.2}$ )	9		20
15	30W4Cr2VA	1050 ~ 1100	油	600	1470	1325	7		40

① 除规定热处理温度上、下限外，表中淬火温度允许偏差为 ±20℃；回火温度允许偏差为 ±50℃，根据需方特殊要求，回火温度允许偏差按 ±30℃ 进行。

2. 弹簧钢交货状态硬度（表 14-39）

表 14-39 弹簧钢交货状态硬度（GB/T 1222—2007）

组号	牌 号	交货状态	硬度 HBW≤
1	65、70	热轧	285
2	85、65Mn		302
3	60Si2Mn、60Si2MnA、50CrVA、 55SiMnVB、55CrMnA、60CrMnA		321
4	60Si2CrA、60Si2CrVA、60CrMnBA、 55SiCrA、30W4Cr2VA	热轧	供需双方协商
		热轧 + 热处理	321
5	所有牌号	冷拉 + 热处理	321
6		冷拉	供需双方协商

14.3 钢板及钢带的力学性能

14.3.1 石油天然气输送用钢板及钢带的力学性能

1. 石油天然气输送管用宽厚钢板的力学性能（表 14-40）

表 14-40 石油天然气输送管用宽厚钢板的力学性能（GB/T 21237—2007）

牌号	规定总延伸 强度 <sup>①</sup> $R_{0.5}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	屈强比 ≤	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	冲击试验 (-20℃, 横向) $A_{KV}/J$ ≥	180°弯曲 试验	落锤撕裂试验 (DWTT) (-10℃, 横向)
L245	245 ~ 445	415 ~ 755	0.90	23	80	$d = 2a$	—
L290	290 ~ 495	415 ~ 755	0.90	22	80	$d = 2a$	—
L320	320 ~ 525	435 ~ 755	0.90	21	90	$d = 2a$	—
L360	360 ~ 530	460 ~ 755	0.90	21	90	$d = 2a$	—
L390	390 ~ 545	490 ~ 755	0.92	19	120	$d = 2a$	—
L415	415 ~ 565	520 ~ 755	0.92	19	120	$d = 2a$	2 个试样平均值 ≥ 85%，单个 试样值 ≥ 70%
L450	450 ~ 600	535 ~ 755	0.92	18	120	$d = 2a$	
L485	485 ~ 620	570 ~ 755	0.92	18	150	$d = 2a$	
L555	555 ~ 690	625 ~ 825	0.93	18	150	$d = 2a$	
L690	690 ~ 840	760 ~ 990	0.95	17	150	$d = 2a$	

注： $d$  为弯心直径， $a$  为板厚。

①  $R_{0.5}$  可用  $R_{eL}$  代替。

2. PSL1 钢带的力学性能（表 14-41）

表 14-41 PSL1 钢带的力学性能（GB/T 14164—2005）

牌 号	拉 伸 试 验			180°冷弯试验 <i>a</i> —试样厚度 <i>d</i> —弯心直径
	规定总延伸强度 $R_{0.5}/(\text{N/mm}^2)$	抗拉强度 $R_m/(\text{N/mm}^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	
S175 I	175	315	27	$d = 2a$
S175 II	175	315	27	
S210	210	335	25	
S245	245	415	21	
S290	290	415	21	
S320	320	435	20	
S360	360	460	19	
S390	390	490	18	
S415	415	520	17	
S450	450	535	17	
S485	485	570	16	

- 注：1. 需方在按钢管标准来选用表中的牌号时，应充分考虑制管过程中包辛格效应对规定总延伸强度的影响，由供需双方协商选用合适的钢带牌号，以保证焊管成品性能符合相应标准的要求。
2. 表中所列拉伸和冷弯试验，规定值适用于横向试样。
3. 在供需双方未规定采用何种标距时，由生产方选定。当发生争议时，以标距为 50mm、宽度为 38mm 的试样进行仲裁。

3. PSL2 钢带的力学性能（表 14-42）

表 14-42 PSL2 钢带的力学性能和工艺性能（GB/T 14164—2005）

牌号	拉 伸 试 验			0℃ 冲击试验		180°冷弯试验 <i>a</i> —试样厚度 <i>d</i> —弯心直径
	规定总延伸强度 $R_{0.5}/(\text{N/mm}^2)$	抗拉强度 $R_m/(\text{N/mm}^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	冲击吸收功 $A_{KV}/\text{J}$	纤维断面率 (%)	
S245	245 ~ 445	415 ~ 755	21	$\geq 40$	—	$d = 2a$
S290	290 ~ 495	415 ~ 755	21	$\geq 42$		
S320	320 ~ 525	435 ~ 755	20			
S360	360 ~ 530	460 ~ 755	19			
S390	390 ~ 545	490 ~ 755	18			
S415	415 ~ 565	520 ~ 755	17			
S450	450 ~ 600	535 ~ 755	17	$\geq 47$		
S485	485 ~ 620	570 ~ 755	16	$\geq 63$	$\geq 70$	$d = 2a$
S555	555 ~ 690	625 ~ 825	15	$\geq 96$		

- 注：1. 需方在按钢管标准来选用表中的牌号时，应充分考虑制管过程中包辛格效应对规定总延伸强度的影响，由供需双方协商选用合适的钢带牌号，以保证焊管成品性能符合相应标准的要求。在考虑包辛格效应时，规定总延伸强度的限制可作相应调整。
2. 表中所列拉伸、冲击和冷弯试验规定值适用于横向试样。
3. 在供需双方未规定采用何种标距时，由生产方选定。当发生争议时，以标距为 50mm、宽度为 38mm 的试样进行仲裁。

## 14.3.2 碳素结构钢钢板及钢带的力学性能

## 1. 优质碳素结构钢冷轧钢带的力学性能 (表 14-43)

表 14-43 优质碳素结构钢冷轧钢带的力学性能 (GB 3522—1983)

钢 号	冷硬钢带(Y)	退火钢带(T)	
	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
15	450 ~ 800	320 ~ 500	22
20	500 ~ 850	320 ~ 550	20
25	550 ~ 900	350 ~ 600	18
30	650 ~ 950	400 ~ 600	16
35	650 ~ 950	400 ~ 650	16
40	650 ~ 1000	450 ~ 700	15
45	700 ~ 1050	450 ~ 700	15
50	750 ~ 1100	450 ~ 750	13
55	750 ~ 1100	450 ~ 750	12
60	750 ~ 1150	450 ~ 750	12
65	750 ~ 1150	450 ~ 750	10
70	750 ~ 1150	450 ~ 750	10

## 2. 优质碳素结构钢冷轧薄钢板和钢带的力学性能 (表 14-44)

表 14-44 优质碳素结构钢冷轧薄钢板和钢带的力学性能 (GB/T 13237—1991)

牌号	拉 延 级 别				
	Z	S 和 P	Z	S	P
	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		断后伸长率 $A_{11.3}(\%) \geq$		
08F	275 ~ 365	275 ~ 380	34	32	30
08、08Al、10F	275 ~ 390	275 ~ 410	32	30	28
10	295 ~ 410	295 ~ 430	30	29	28
15F	315 ~ 430	315 ~ 450	29	28	27
15	335 ~ 450	335 ~ 470	27	26	25
20	355 ~ 490	355 ~ 500	26	25	24
25	—	390 ~ 540	—	24	23
30	—	440 ~ 590	—	22	21
35	—	490 ~ 635	—	20	19
40	—	510 ~ 650	—	—	18
45	—	530 ~ 685	—	—	16
50	—	540 ~ 715	—	—	14

3. 优质碳素结构钢热轧厚钢板和钢带的力学性能（表 14-45）

表 14-45 优质碳素结构钢热轧厚钢板和钢带的力学性能（GB/T 711—2008）

牌号	交货 状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	牌号	交货 状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$				$\geq$	
08F	热轧或 热处理	315	34	50	热处理	625	16
08		325	33	55		645	13
10F		325	32	60		675	12
10		335	32	65		695	10
15F		355	30	70		715	9
15		370	30	20Mn	热轧或 热处理	450	24
20		410	28	25Mn		490	22
25		450	24	30Mn		540	20
30	热处理	490	22	40Mn	热处理	590	17
35		530	20	50Mn		650	13
40		570	19	60Mn		695	11
45		600	17	65Mn		735	9

4. 优质碳素结构钢热轧钢带的力学性能（表 14-46）

表 14-46 优质碳素结构钢热轧钢带的力学性能（GB/T 8749—2008）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$
	$\geq$	
08Al	290	35
08	325	33
10	335	32
15	370	30
20	410	25
25	450	24
30	490	22
35	530	20
40	570	19
45	600	17

5. 优质碳素结构钢热轧薄钢板和钢带的拉伸性能（表 14-47）

表 14-47 优质碳素结构钢热轧薄钢板和钢带的拉伸性能 (GB/T 710—2008)

牌 号	拉 延 级 别				
	Z	S 和 P	Z	S	P
	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		断后伸长率 $A(\%) \geq$		
08、08Al	275 ~ 410	$\geq 300$	36	35	34
10	280 ~ 410	$\geq 335$	36	34	32
15	300 ~ 430	$\geq 370$	34	32	30
20	340 ~ 480	$\geq 410$	30	28	26
25	—	$\geq 450$	—	26	24
30	—	$\geq 490$	—	24	22
35	—	$\geq 530$	—	22	20
40	—	$\geq 570$	—	—	19
45	—	$\geq 600$	—	—	17
50	—	$\geq 610$	—	—	16

14.3.3 合金结构钢薄钢板的力学性能 (表 14-48)

表 14-48 合金结构钢薄钢板的力学性能 (YB/T 5132—2007)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%) \geq$
12Mn2A	390 ~ 570	22
16Mn2A	490 ~ 635	18
45Mn2A	590 ~ 835	12
35B	490 ~ 635	19
40B	510 ~ 655	18
45B	540 ~ 685	16
50B, 50BA	540 ~ 715	14
15Cr, 15CrA	390 ~ 590	19
20Cr	390 ~ 590	18
30Cr	490 ~ 685	17
35Cr	540 ~ 735	16
38CrA	540 ~ 735	16
40Cr	540 ~ 785	14
20CrMnSiA	440 ~ 685	18
25CrMnSiA	490 ~ 685	18
30CrMnSi, 30CrMnSiA	490 ~ 735	16
35CrMnSiA	590 ~ 785	14



14.3.4 压力容器用钢板的力学性能

1. 压力容器用调质高强度钢板的力学性能（表 14-49）

表 14-49 压力容器用调质高强度钢板的力学性能和  
工艺性能（GB 19189—2003）

牌 号	拉伸试验			冲击试验(横向)	
	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	温度/℃	冲击吸收功 $A_{KV}/J$
07MnCrMoVR	490	610 ~ 730	17	-20	47
07MnNiMoVDR	490	610 ~ 730	17	-40	47
12MnNiVR	490	610 ~ 730	17	-10	54
				-20	47

2. 低温压力容器用低合金钢钢板的力学性能（表 14-50）

表 14-50 低温压力容器用低合金钢钢板的力学性能和  
工艺性能（GB 3531—2008）

牌号	钢板公称 厚度/mm	拉伸试验			冲击试验	
		抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 <sup>①</sup> $R_{el.}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	温度/℃	冲击吸收能量 $KV_2/J \geq$
			$\geq$			
16MnDR	6 ~ 16	490 ~ 620	315	21	-40	34
	> 16 ~ 36	470 ~ 600	295			
	> 36 ~ 60	460 ~ 590	285		-30	34
	> 60 ~ 100	450 ~ 580	275			
	> 100 ~ 120	440 ~ 570	265			
15MnNiDR	6 ~ 16	490 ~ 620	325	20	-45	34
	> 16 ~ 36	480 ~ 610	315			
	> 36 ~ 60	470 ~ 600	305			
09MnNiDR	6 ~ 16	440 ~ 570	300	23	-70	34
	> 16 ~ 36	430 ~ 560	280			
	> 36 ~ 60	430 ~ 560	270			
	> 60 ~ 120	420 ~ 550	260			

① 当屈服现象不明显时，采用  $R_{p0.2}$ 。

3. 锅炉和压力容器用钢板的高温力学性能（表 14-51）

表 14-51 锅炉和压力容器用钢板的高温力学性能 (GB 713—2008)

牌号	厚度/mm	试验温度/℃						
		200	250	300	350	400	450	500
		下屈服强度或规定非比例延伸强度 $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )    ≥						
Q245R	> 20 ~ 36	186	167	153	139	129	121	—
	> 36 ~ 60	178	161	147	133	123	116	—
	> 60 ~ 100	164	147	135	123	113	106	—
	> 100 ~ 150	150	135	120	110	105	95	—
Q345R	> 20 ~ 36	255	235	215	200	190	180	—
	> 36 ~ 60	240	220	200	185	175	165	—
	> 60 ~ 100	225	205	185	175	165	155	—
	> 100 ~ 150	220	200	180	170	160	150	—
	> 150 ~ 200	215	195	175	165	155	145	—
Q370R	> 20 ~ 36	290	275	260	245	230	—	—
	> 36 ~ 60	280	270	255	240	225	—	—
18MnMoNbR	30 ~ 60	360	355	350	340	310	275	—
	60 ~ 100	355	350	345	335	305	270	—
13MnNiMoR	30 ~ 100	355	350	345	335	305	—	—
	100 ~ 150	345	340	335	325	300	—	—
15CrMoR	20 ~ 60	240	225	210	200	189	179	174
	60 ~ 100	220	210	196	186	176	167	162
	100 ~ 150	210	199	185	175	165	156	150
14Cr1MoR	20 ~ 150	255	245	230	220	210	195	176
12Cr2Mo1R	20 ~ 150	260	255	250	245	240	230	215
12Cr1MoVR	20 ~ 100	200	190	176	167	157	150	142

14.3.5 冷轧钢板及钢带的力学性能

1. 低碳钢冷轧钢带的力学性能 (表 14-52)

表 14-52 低碳钢冷轧钢带的力学性能 (YB/T 5059—2005)

钢带软硬级别	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{xmm}$ (%)    ≥
特软 S2	275 ~ 390	30
软 S	325 ~ 440	20
半软 S1/2	370 ~ 490	10
低硬 H1/4	410 ~ 540	4
冷硬 H	490 ~ 785	不测定

注:  $A_{xmm}$  中  $x$  表示试样标距长度值。

2. 冷轧低碳钢板及钢带的力学性能（表 14-53）

表 14-53 冷轧低碳钢板及钢带的力学性能（GB/T 5213—2008）

牌号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{\text{eL}}$ 或 $R_{\text{p0.2}}/(N/mm^2)$ $\leq$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{80\text{mm}}(\%)$ ( $L_0=80\text{mm}, b=20\text{mm}$ ) $\geq$	塑性应变比 $r_{90}^{(2)}$ $\geq$	应变硬化指数 $n_{90}^{(3)}$ $\geq$
DC01	280	270 ~ 410	28	—	—
DC03	240	270 ~ 370	34	1.3	—
DC04	210	270 ~ 350	38	1.6	0.18
DC05	180	270 ~ 330	40	1.9	0.20
DC06	170	270 ~ 330	41	2.1	0.22
DC07	150	250 ~ 310	44	2.5	0.23

- ① 无明显屈服时采用  $R_{\text{p0.2}}$ ，否则采用  $R_{\text{eL}}$ 。当厚度大于 0.50mm 且不大于 0.70mm 时，屈服强度上限值可以增加 20N/mm<sup>2</sup>；当厚度不大于 0.50mm 时，屈服强度上限值可以增加 40N/mm<sup>2</sup>。
- ② 相对于轧制方向 90° 的塑性应变比。
- ③ 相对于轧制方向 90° 的拉伸应变硬化指数。

3. 冷成形用加磷高强度冷轧钢板和钢带的力学性能（表 14-54）

表 14-54 冷成形用加磷高强度冷轧钢板和钢带的力学性能（YB/T 166—2000）

牌 号	下屈服强度 $R_{\text{eL}}$ $/(N/mm^2) \geq$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率(%)		180°冷弯试验 $d$ —弯心直径 $a$ —试样厚度
			$A_{11.3} \geq$	$A_{80\text{mm}} \geq$	
P175	175	340 ~ 410	34	—	$d=0$ , 完好
P205	205	370 ~ 440	32	—	
P235	235	390 ~ 460	30	—	
P200	200	340 ~ 420	—	30	$d=0$ , 完好
P240	240	380 ~ 470	—	28	
P210	210	340 ~ 420	35	—	$d=0$ , 完好
P250	250	380 ~ 470	32	—	
P290	290	440 ~ 560	24	—	$d=a$ , 完好

注：冷弯试验试样宽度  $B=35\text{mm}$ 。

4. 搪瓷用冷轧低碳钢板及钢带的力学性能（表 14-55）

表 14-55 搪瓷用冷轧低碳钢板及钢带的力学性能 (GB/T 13790—2008)

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}^{①②}$ $/(N/mm^2) \leq$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 <sup>③④</sup> $A_{80mm}(\%) \geq$	塑性应变比 $r_{90}^{⑤} \geq$	应变硬化指数 $n_{90}^{⑤} \geq$
DC01EK	280	270 ~ 410	30	—	—
DC03EK	240	270 ~ 370	34	1.3	—
DC05EK	200	270 ~ 350	38	1.6	0.18

- ① 无明显屈服时, 采用  $R_{p0.2}$ 。当厚度大于 0.50mm, 且不大于 0.70mm 时, 屈服强度上限值可以增加 20N/mm<sup>2</sup>; 当厚度不大于 0.50mm 时, 屈服强度上限值可以增加 40N/mm<sup>2</sup>。
- ② 经供需双方协商同意, DC01EK 和 DC03EK 屈服强度下限值可设定为 140N/mm<sup>2</sup>, DC05EK 可设定为 120N/mm<sup>2</sup>。
- ③ 试样宽度  $b$  为 20mm, 试样方向为横向。
- ④ 当厚度大于 0.50mm 且不大于 0.70mm 时, 断后伸长率最小值可以降低 2% (绝对值); 当厚度不大于 0.50mm 时, 断后伸长率最小值可以降低 4% (绝对值)。
- ⑤  $r_{90}$  值和  $n_{90}$  值的要求仅适用于厚度不小于 0.50mm 的产品。当厚度大于 2.0mm 时,  $r_{90}$  值可以降低 0.2。

5. 碳素结构钢冷轧薄钢板及钢带的力学性能 (表 14-56)

表 14-56 碳素结构钢冷轧薄钢板及钢带的力学性能 (GB/T 11253—2007)

牌 号	下屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ $/(N/mm^2) \geq$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 (%)	
			$A_{50mm} \geq$	$A_{80mm} \geq$
Q195	195	315 ~ 430	26	24
Q215	215	335 ~ 450	24	22
Q235	235	370 ~ 500	22	20
Q275	275	410 ~ 540	20	18

- ① 无明显屈服时, 采用  $R_{p0.2}$ 。

6. 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢带的力学性能 (表 14-57)

表 14-57 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢带的力学性能 (GB/T 3524—2005)

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
	$\geq$		$\geq$
Q195	(195) <sup>①</sup>	315 ~ 430	33
Q215	215	335 ~ 450	31
Q235	235	375 ~ 500	26
Q255	255	410 ~ 550	24
Q275	275	490 ~ 630	20
Q295	295	390 ~ 570	23
Q345	345	470 ~ 630	21

14.3.6 汽车用钢板和钢带的力学性能

1. 汽车大梁用热轧钢板和钢带的力学性能（表 14-58）

表 14-58 汽车大梁用热轧钢板和钢带的力学性能（GB/T 3273—2005）

序号	牌号	厚度规格/mm	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%) ≥
1	370L	1.6 ~ 14.0	245	370 ~ 480	28
2	420L	1.6 ~ 14.0	280	420 ~ 520	26
3	440L	1.6 ~ 14.0	305	440 ~ 540	26
4	510L	1.6 ~ 14.0	355	510 ~ 630	24
5	550L	1.6 ~ 8.0	400	550 ~ 670	23

2. 汽车车轮用热轧钢板和钢带的力学性能（表 14-59）

表 14-59 汽车车轮用热轧钢板和钢带的力学性能（YB/T 4151—2006）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
		≥	
330CL	330 ~ 430	225	33
380CL	380 ~ 480	235	28
440CL	440 ~ 550	290	26
490CL	490 ~ 600	325	24
540CL	540 ~ 660	355	22
590CL	590 ~ 710	420	20

3. 汽车用高强度冷连轧钢板及钢带（烘烤硬化钢）的力学性能（表 14-60）

表 14-60 汽车用高强度冷连轧钢板及钢带（烘烤硬化钢）  
的力学性能（GB/T 20564.1—2007）

牌 号	上屈服强度 $R_{eH}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	塑性应 变比 $r_{90}$ ≥	应变硬化 指数 $n_{90}$ ≥	烘烤硬化值 $BH_2$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥
CR140BH	140 ~ 200	270	36	1.8	0.20	30
CR180BH	180 ~ 240	300	32	1.6	0.18	30
CR220BH	220 ~ 280	320	30	1.4	0.16	30
CR260BH	260 ~ 320	360	28	—	—	30
CR300BH	300 ~ 360	400	26	—	—	30

14.3.7 连续热镀合金镀层钢板及钢带的力学性能

1. 热镀铅锡合金碳素钢冷轧薄钢板及钢带的力学性能（表 14-61）

表 14-61 热镀铅锡合金碳素钢冷轧薄钢板及钢带的力学性能（GB/T 5065—2004）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{80mm}(\%)$
LT01	—	275 ~ 390	$\geq 28$
LT02	—	275 ~ 410	$\geq 30$
LT03	—	275 ~ 410	$\geq 32$
LT04	$\leq 230$	275 ~ 350	$\geq 36$
LT05	$\leq 180$	270 ~ 330	$\geq 40$

2. 连续热镀铝硅合金钢板和钢带的力学性能（表 14-62）

表 14-62 连续热镀铝硅合金钢板和钢带的力学性能（YB/T 167—2000）

基体金属品级		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
代 号	名 称		
01	普通级	—	—
02	冲压级	$\leq 430$	$\geq 30$
03	深冲级	$\leq 410$	$\geq 34$
04	超深冲级	$\leq 410$	$\geq 40$

3. 连续热镀铝锌合金镀层钢板及钢带的力学性能

1) 第一类连续热镀铝锌合金镀层钢板及钢带的力学性能如表 14-63 所示。

表 14-63 第一类连续热镀铝锌合金镀层钢板及钢带的力学性能（GB/T 14978—2008）

牌 号	拉伸试验 <sup>①</sup>		
	屈服强度 <sup>②</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \leq$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \leq$	断后伸长率 <sup>③</sup> $A_{80mm}(\%) \geq$
DX51D + AZ	—	500	22
DX52D + AZ <sup>④</sup>	300	420	26
DX53D + AZ	260	380	30
DX54D + AZ	220	350	36

- ① 试样为 GB/T 228 中的 P6 试样，试样方向为横向。
- ② 当屈服现象不明显时采用  $R_{p0.2}$ ，否则采用  $R_{eL}$ 。
- ③ 当产品公称厚度大于 0.5mm，但小于等于 0.7mm 时，断后伸长率允许下降 2%；当产品公称厚度不大于 0.5mm 时，断后伸长率允许下降 4%。
- ④ 屈服强度值仅适用于光整的 FB 级表面的钢板及钢带。

2) 第二类连续热镀铝锌合金镀层钢板及钢带的力学性能如表 14-64 所示。

表 14-64 连续热镀铝锌合金镀层钢板及钢带的力学性能 (GB/T 14978—2008)

牌 号	拉伸试验 <sup>①</sup>		
	屈服强度 <sup>②</sup> $R_{eH}$ 或 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ $\geq$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 <sup>③</sup> $A_{80mm}(\%)$ $\geq$
S250GD + AZ	250	330	19
S280GD + AZ	280	360	18
S300GD + AZ	300	380	17
S320GD + AZ	320	390	17
S350GD + AZ	350	420	16
S550GD + AZ	550	560	—

- ① 试样为 GB/T 228 中的 P6 试样, 试样方向为纵向。  
② 当屈服现象不明显时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eH}$ 。  
③ 当产品公称厚度大于 0.5mm, 但小于等于 0.7mm 时, 断后伸长率允许下降 2%; 当产品公称厚度不大于 0.5mm 时, 断后伸长率允许下降 4%。

4. 连续热镀锌钢板及钢带的力学性能

1) 第一类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-65 所示。

表 14-65 第一类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{80mm}(\%)$ $\geq$	塑性应变比 $r_{90}$ $\geq$	应变硬化指数 $n_{90}$ $\geq$
DX51D + Z, DX51D + ZF	—	270 ~ 500	22	—	—
DX52D + Z, DX52D + ZF	140 ~ 300	270 ~ 420	26	—	—
DX53D + Z, DX53D + ZF	140 ~ 260	270 ~ 380	30	—	—
DX54D + Z	120 ~ 220	260 ~ 350	36	1.6	0.18
DX54D + ZF			34	1.4	0.18
DX56D + Z	120 ~ 180	260 ~ 350	39	1.9	0.21
DX56D + ZF			37	1.7	0.20
DX57D + Z	120 ~ 170	260 ~ 350	41	2.1	0.22
DX57D + ZF			39	1.9	0.21

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。



2) 第二类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-66 所示。

表 14-66 第二类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥
S220GD + Z, S220GD + ZF	220	300	20
S250GD + Z, S250GD + ZF	250	330	19
S280GD + Z, S280GD + ZF	280	360	18
S320GD + Z, S320GD + ZF	320	390	17
S350GD + Z, S350GD + ZF	350	420	16
S550GD + Z, S550GD + ZF	550	560	—

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。

3) 第三类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-67 所示。

表 14-67 第三类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	塑性应变比 $r_{90}$ ≥	应变硬化指数 $n_{90}$ ≥
HX180YD + Z	180 ~ 240	340 ~ 400	34	1.7	0.18
HX180YD + ZF			32	1.5	0.18
HX220YD + Z	220 ~ 280	340 ~ 410	32	1.5	0.17
HX220YD + ZF			30	1.3	0.17
HX260YD + Z	260 ~ 320	380 ~ 440	30	1.4	0.16
HX260YD + ZF			28	1.2	0.16

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。

4) 第四类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-68 所示。

表 14-68 第四类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	塑性应变比 $r_{90}$ ≥	应变硬化指数 $n_{90}$ ≥	烘烤硬化值 $BH_2$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥
HX180BD + Z	180 ~ 240	300 ~ 360	34	1.5	0.16	30
HX180BD + ZF			32	1.3	0.16	30
HX220BD + Z	220 ~ 280	340 ~ 400	32	1.2	0.15	30
HX220BD + ZF			30	1.0	0.15	30
HX260BD + Z	260 ~ 320	360 ~ 440	28			30
HX260BD + ZF			26			30
HX300BD + Z	300 ~ 360	400 ~ 480	26			30
HX300BD + ZF			24			30

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。

5) 第五类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-69 所示。

表 14-69 第五类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) $\geq$
HX260LAD + Z	260 ~ 330	350 ~ 430	26
HX260LAD + ZF			24
HX300LAD + Z	300 ~ 380	380 ~ 480	23
HX300LAD + ZF			21
HX340LAD + Z	340 ~ 420	410 ~ 510	21
HX340LAD + ZF			19
HX380LAD + Z	380 ~ 480	440 ~ 560	19
HX380LAD + ZF			17
HX420LAD + Z	420 ~ 520	470 ~ 590	17
HX420LAD + ZF			15

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ ，否则采用  $R_{eL}$ 。

6) 第六类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-70 所示。

表 14-70 第六类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) $\geq$	应变硬化指数 $n_0$ $\geq$	烘烤硬化值 $BH_2$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$
HC260/450DPD + Z	260 ~ 340	450	27	0.16	30
HC260/450DPD + ZF			25		30
HC300/500DPD + Z	300 ~ 380	500	23	0.15	30
HC300/500DPD + ZF			21		30
HC340/600DPD + Z	340 ~ 420	600	20	0.14	30
HC340/600DPD + ZF			18		30
HC450/780DPD + Z	450 ~ 560	780	14		30
HC450/780DPD + ZF			12		30
HC600/980DPD + Z	600 ~ 750	980	10		30
HC600/980DPD + ZF			8		30

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ ，否则采用  $R_{eL}$ 。

7) 第七类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-71 所示。

表 14-71 第七类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	应变硬化指数 $n_0$ ≥	烘烤硬化值 $BH_2$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥
HC430/690TRD + Z	430 ~ 550	690	23	0.18	40
HC430/690TRD + ZF			21		40
HC470/780TRD + Z	470 ~ 600	780	21	0.16	40
HC470/780TRD + ZF			18		40

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。

8) 第八类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能如表 14-72 所示。

表 14-72 第八类连续热镀锌钢板及钢带的力学性能 (GB/T 2518—2008)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	烘烤硬化值 $BH_2$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥
HC350/500CPD + Z	350 ~ 500	600	16	30
HC350/500CPD + ZF			14	
HC500/780CPD + Z	500 ~ 700	780	10	30
HC500/780CPD + ZF			8	
HC700/980CPD + Z	700 ~ 900	980	7	30
HC700/980CPD + ZF			5	

① 无明显屈服时采用  $R_{p0.2}$ , 否则采用  $R_{eL}$ 。

5. 热镀基板彩涂板的力学性能 (表 14-73)

表 14-73 热镀基板彩涂板的力学性能 (GB/T 12754—2006)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	
			公称厚度/mm	
			≤0.7	>0.70
TDC51D + Z、TDC51D + ZF、TDC51D + AZ、TDC51D + ZA	—	270 ~ 500	20	22
TDC52D + Z、TDC52D + ZF、TDC52D + AZ、TDC52D + ZA	140 ~ 300	270 ~ 420	24	26
TDC53D + Z、TDC53D + ZF、TDC53D + AZ、TDC53D + ZA	140 ~ 260	270 ~ 380	28	30
TDC54D + Z、TDC54D + AZ、TDC54D + ZA	140 ~ 220	270 ~ 350	34	36
TDC54D + ZF	140 ~ 220	270 ~ 350	32	34
TS250GD + Z、TS250GD + ZF、TS250GD + AZ、TS250GD + ZA	250	330	17	19
TS280GD + Z、TS280GD + ZF、TS280GD + AZ、TS280GD + ZA	280	360	16	18

(续)

牌 号	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{80mm}$ (%) ≥	
			公称厚度/mm	
			≤0.7	>0.70
TS300GD + AZ	300	380	16	18
TS320GD + Z、TS320GD + ZF、TS320GD + AZ、TS320GD + ZA	320	390	15	17
TS350GD + Z、TS350GD + ZF、TS350GD + AZ、TS350GD + ZA	350	420	14	16
TS550GD + Z、TS550GD + ZF、TS550GD + AZ、TS550GD + ZA	550	560	—	—

注：拉伸试验试样的方向为纵向（沿轧制方向）。

① 当屈服现象不明显时采用  $R_{p0.2}$ ，否则采用  $R_{eH}$ 。

14.3.8 特殊结构钢板及钢带的力学性能

1. 建筑结构用钢板的力学性能（表 14-74）

表 14-74 建筑结构用钢板的力学性能（GB/T 19879—2005）

牌号	质量等级	上屈服强度 $R_{eH}/(\text{N}/\text{mm}^2)$				抗拉强度 $R_m/$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	断后伸长率 $A(\%)$	冲击吸收功 (纵向) $A_{KV}/\text{J}$	
		钢板厚度/mm						温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\geq$
		6 ~ 16	>16 ~ 35	>35 ~ 50	>50 ~ 100				
Q235GJ	B	$\geq 235$	235 ~ 355	225 ~ 345	215 ~ 335	400 ~ 510	$\geq 23$	20	34
	C							0	
	D							-20	
	E							-40	
Q345GJ	B	$\geq 345$	345 ~ 465	335 ~ 455	325 ~ 445	490 ~ 610	$\geq 22$	20	34
	C							0	
	D							-20	
	E							-40	
Q390GJ	C	$\geq 390$	390 ~ 510	380 ~ 500	370 ~ 490	490 ~ 650	$\geq 20$	0	34
	D							-20	
	E							-40	
Q420GJ	C	$\geq 420$	420 ~ 550	410 ~ 540	400 ~ 530	520 ~ 680	$\geq 19$	0	34
	D							-20	
	E							-40	
Q460GJ	C	$\geq 460$	460 ~ 600	450 ~ 590	440 ~ 580	550 ~ 720	$\geq 17$	0	34
	D							-20	
	E							-40	

## 2. 金属软管用碳素钢冷轧钢带的力学性能 (表 14-75)

表 14-75 金属软管用碳素钢冷轧钢带的力学性能 (YB/T 023—1992)

状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
软态	275 ~ 440	$\geq 23$
冷硬	—	—

## 3. 热处理弹簧钢带的抗拉强度 (表 14-76)

表 14-76 热处理弹簧钢带的抗拉强度 (YB/T 5063—2007)

强度级别	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$
I	1270 ~ 1560
II	> 1560 ~ 1860
III	> 1860

## 4. 舰船用铁镍合金板材的力学性能 (表 14-77)

表 14-77 舰船用铁镍合金板材的力学性能 (CB 1330—1997)

合 金 牌 号	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
FN—1	$\geq 220$	$\geq 520$	$\geq 35$
FN—2			
FN—3			

## 5. 高级建筑结构用钢板的力学性能 (表 14-78)

表 14-78 高级建筑结构用钢板的力学性能 (YB 4104—2000)

牌号	质量等级	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$ (在下列厚度时)				抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	冲击吸收功	
		6 ~ 16mm	> 16 ~ 35mm	> 35 ~ 50mm	> 50 ~ 100mm			温度/℃	$A_{KV}/J$
Q235GJ	C	$\geq 235$	235 ~ 345	225 ~ 335	215 ~ 325	400 ~ 510	$\geq 23$	0	$\geq 34$
	D							-20	
	E							-40	
Q345GJ	C	$\geq 345$	345 ~ 455	335 ~ 445	325 ~ 435	490 ~ 610	$\geq 22$	0	$\geq 34$
	D							-20	
	E							-40	
Q235GJZ	C	—	235 ~ 345	225 ~ 335	215 ~ 325	400 ~ 510	$\geq 23$	0	$\geq 34$
	D							-20	
	E							-40	
Q345GJZ	C	—	345 ~ 455	335 ~ 445	325 ~ 435	490 ~ 610	$\geq 22$	0	$\geq 34$
	D							-20	
	E							-40	

6. 高强度结构用调质钢板的力学性能（表 14-79）

表 14-79 高强度结构用调质钢板的力学性能（GB/T 16270—2009）

牌号	拉伸试验 <sup>①</sup>						冲击试验 <sup>①</sup>				
	上屈服强度 <sup>②</sup> $R_{eH}/(N/mm^2) \geq$			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后 伸长率 $A(\%)$	冲击吸收能量(纵向) $KV_2/J$			
	厚度/mm			厚度/mm				试验温度/℃			
	$\leq 50$	$> 50 \sim 100$	$> 100 \sim 150$	$\leq 50$	$> 50 \sim 100$	$> 100 \sim 150$		0	-20	-40	-60
Q460C Q460D Q460E Q460F	460	440	400	550 ~ 720		500 ~ 670	17	47	47	34	34
Q500C Q500D Q500E Q500F	500	480	440	590 ~ 770		540 ~ 720	17	47	47	34	34
Q550C Q550D Q550E Q550F	550	530	490	640 ~ 820		590 ~ 770	16	47	47	34	34
Q620C Q620D Q620E Q620F	620	580	560	700 ~ 890		650 ~ 830	15	47	47	34	34
Q690C Q690D Q690E Q690F	690	650	630	770 ~ 940	760 ~ 930	710 ~ 900	14	47	47	34	34
Q800C Q800D Q800E Q800F	800	740	—	840 ~ 1000	800 ~ 1000	—	13	34	34	27	27
Q890C Q890D Q890E Q890F	890	830	—	940 ~ 1100	880 ~ 1100	—	11	34	34	27	27
Q960C Q960D Q960E Q960F	960	—	—	980 ~ 1150	—	—	10	34	34	27	27

① 拉伸试验适用于横向试样，冲击试验适用于纵向试样。  
② 当屈服现象不明显时，采用  $R_{p0.2}$ 。

7. 焊接气瓶用钢板和钢带的力学性能（表 14-80）

表 14-80 焊接气瓶用钢板和钢带的力学性能（GB 6653—2008）

牌 号	拉 伸 试 验			
	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率(%)	
			$A_{80mm}(L_0=80mm, b=20mm)$	$A$
			<3mm	≥3mm
HP235	≥235	380~500	≥23	≥29
HP265	≥265	410~520	≥21	≥27
HP295	≥295	440~560	≥20	≥26
HP325	≥325	490~600	≥18	≥22
HP345	≥345	510~620	≥17	≥21

注：1. 拉伸试验、弯曲试验均取横向试样。  
2. 当屈服现象不明显时，采用  $R_{p0.2}$ 。  
3. 弯曲试样仲裁试样宽度  $b=35mm$ 。  
4.  $a$  为钢材厚度。

8. 焊管用镀铜钢带的力学性能（表 14-81）

表 14-81 焊管用镀铜钢带的力学性能（YB/T 069—2007）

厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ <sup>①</sup> /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ <sup>②</sup> (%)
<0.25	≥270	≥180	≥30
0.25~<0.35			≥32
0.35~<0.50			≥34
≥0.50			≥36

① 当屈服现象不明显时采用  $R_{p0.2}$ 。  
② 试样类型为 GB/T 228 中试样编号的 P14，纵向试样宽度 = 25mm，试样原始标距 = 50mm。

9. 单层焊管用超低碳钢带的力学性能（表 14-82）

表 14-82 单层焊管用超低碳钢带的力学性能（YB/T 069—2007）

厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ <sup>①</sup> /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ <sup>②</sup> (%)
≤0.50	≥280	130~250	≥36
>0.50			≥38

① 当屈服现象不明显时采用  $R_{p0.2}$ 。  
② 试样类型为 GB/T 228 中试样编号的 P14，纵向试样宽度 = 25mm，试样原始标距 = 50mm。



10. 铠装电缆用钢带的力学性能（表 14-83）

表 14-83 铠装电缆用钢带的力学性能（YB/T 024—2008）

钢带公称厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断后伸长率试样 标距/mm
	$\geq$		
$\leq 0.20$	295	17	50
0.20 ~ 0.30	295	20	50
$> 0.30$	295	20	80

11. 无取向钢电工钢带的力学性能（表 14-84）

表 14-84 无取向钢电工钢带的力学性能（GB/T 2521—2008）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /( $N/mm^2$ ) $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /( $N/mm^2$ ) $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$
35W230	450	10	50W400	400	14
35W250	440		50W470	380	16
35W270	430	11	50W530	360	
35W300	420		50W600	340	21
35W330	410	14	50W700	320	22
35W360	400		50W800	300	
35W400	390	16	50W1000	290	
35W440	380		50W1300	290	
50W230	450	10	65W600	340	
50W250	450		65W700	320	
50W270	450		65W800	300	
50W290	440		65W1000	290	
50W310	430	11	65W1300	290	
50W330	425		65W1600	290	
50W350	420				

12. 包装用钢带的力学性能（表 14-85）

表 14-85 包装用钢带的力学性能（YB/T 025—2002）

组 别		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$	
低强	I	590	5
	II	685	5
中强	III	735	5
	IV	785	6
高强	V	880	8
	VI	930	8
	VII	980	12

13. 自行车链条用冷轧钢带的力学性能（表 14-86）

表 14-86 自行车链条用冷轧钢带的力学性能（YB/T 5064—1993）

抗拉强度组别	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$
I 组钢带	785 ~ 980
II 组钢带	835

14. 低焊接裂纹敏感性高强度钢板的力学性能（表 14-87）

表 14-87 低焊接裂纹敏感性高强度钢板的  
力学性能（YB/T 4137—2005）

牌 号	质量等级	上屈服强度 $R_{eH}/(N/mm^2)$		抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	弯曲,180° $d$ —弯心直径 $a$ —试样厚度	冲击试验(纵向)	
		厚度/mm					温度/℃	冲击吸收功 $A_{KV}/J$
		≤50	> 50 ~ 100					
Q460CF	C	≥460	≥440	550 ~ 710	≥17	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47
Q500CF	C	≥500	≥480	610 ~ 770	≥17	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47
Q550CF	C	≥550	≥530	670 ~ 830	≥16	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47
Q620CF	C	≥620	≥600	710 ~ 880	≥15	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47
Q690CF	C	≥690	≥670	770 ~ 940	≥14	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47
Q800CF	C	≥800	协议	880 ~ 1050	≥12	$d = 3a$	0	≥47
	D						-20	≥47
	E						-40	≥47

注：屈服现象不明显时，可以测量非比例伸长应力  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eH}$ 。

14.4 钢管的力学性能

14.4.1 压力设备用钢管的力学性能

1. 低中压锅炉用无缝钢管的力学性能（表 14-88）

表 14-88 低中压锅炉用无缝钢管的力学性能（GB 3087—2008）

牌号	抗拉强度 $R_m / (\text{N/mm}^2)$	下屈服强度 $R_{eL} / (\text{N/mm}^2)$		断后伸长率 $A (\%)$
		壁厚/mm		
		$\leq 16$	$> 16$	
		$\geq$		
10	335 ~ 475	205	195	24
20	410 ~ 550	245	235	20

2. 低中压锅炉用无缝钢管在高温下的规定非比例延伸强度（表 14-89）

表 14-89 低中压锅炉用无缝钢管在高温下的规定非比例延伸  
强度最小值（GB 3087—2008）

牌号	试样状态	试验温度/℃					
		200	250	300	350	400	450
		规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 最小值/ $(N/mm^2)$					
10	供货状态	165	145	122	111	109	107
20		188	170	149	137	134	132

3. 低中压锅炉用电焊钢管的力学性能（表 14-90）

表 14-90 低中压锅炉用电焊钢管的力学性能（YB 4102—2000）

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
10	335 ~ 475	$\geq 195$	$\geq 28$
20	410 ~ 550	$\geq 245$	$\geq 24$

4. 低中压锅炉用电焊钢管在高温下的规定非比例延伸强度（表 14-91）

表 14-91 低中压锅炉用电焊钢管在高温下的规定非比例  
延伸强度最小值（YB 4102—2000）

牌号	试样状态	温度/℃					
		200	250	300	350	400	450
		规定非比例延伸强度 $P_{p0.2}$ 最小值/ $(N/mm^2) \geq$					
10	供货状态	165	145	122	111	109	107
20		188	170	149	137	134	132

5. 低压流体输送用焊接钢管的力学性能（表 14-92）

表 14-92 低压流体输送用焊接钢管的力学性能（GB/T 3091—2008）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2) \geq$		抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A$ $(\%) \geq$
	壁厚 $\delta \leq 16mm$	壁厚 $\delta > 16mm$		
Q195	195	185	315	33
Q215A、Q215B	215	205	335	31
Q235A、Q235B	235	225	370	26
Q295A、Q295B	295	275	390	23
Q345A、Q345B	345	325	470	21

6. 低温管道用无缝钢管的力学性能（表 14-93）

表 14-93 低温管道用无缝钢管的力学性能（GB/T 18984—2003）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$		断后伸长率 <sup>①</sup> $A(\%)$		
		壁厚 $\leq 16mm$	壁厚 $> 16mm$	1 号试样	2 号试样 <sup>②</sup>	3 号试样
16MnDG	490 ~ 665	$\geq 325$	$\geq 315$	$\geq 30$		
10MnDG	$\geq 400$	$\geq 240$		$\geq 35$		
09DG	$\geq 385$	$\geq 210$		$\geq 35$		
09Mn2VDG	$\geq 450$	$\geq 300$		$\geq 30$		
06Ni3MoDG	$\geq 455$	$\geq 250$		$\geq 30$		

- ① 外径小于 20mm 的钢管，本表规定的断后伸长率值不适用，其断后伸长率值由供需双方商定。
- ② 壁厚小于 8mm 的钢管，用 2 号试样进行拉伸试验时，壁厚每减少 1mm 其断后伸长率的最小值应从本表规定最小断后伸长率中减去 1.5%，并按数字修约规则修约为整数。

7. 柴油机用高压无缝钢管钢的力学性能（表 14-94）

表 14-94 柴油机用高压无缝钢管钢的力学性能（GB/T 3093—2002）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$	
10A	335 ~ 470	205	30
20A	390 ~ 540	245	25
Q345A	470 ~ 630	345	22

8. 高压化肥设备用无缝钢管钢的力学性能（表 14-95）

表 14-95 高压化肥设备用无缝钢管钢的力学性能 (GB 6479—2000)

序号	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	冲击吸收功 $A_{KU2}/J$
1	10	335 ~ 490	205	24	—	—
2	20	410 ~ 550	245	24	—	39
3	16Mn	490 ~ 670	320	21	—	47
4	15MnV	510 ~ 690	350	19	—	47
5	12CrMo	410 ~ 560	205	21	—	55
6	15CrMo	440 ~ 640	235	21	—	47
7	12Cr2Mo	450 ~ 600	280	20	—	38
8	10MoWVNb	470 ~ 670	295	19	—	62
9	1Cr5Mo	390 ~ 590	195	22	—	94
10	12SiMoVNb	≥470	315	19	50	47

注：用 12Cr2Mo 钢制造的钢管，当外径不大于 30mm 且壁厚不大于 3mm 时，其  $R_{p0.2}$  允许降低 10N/mm<sup>2</sup>。  
其他牌号当壁厚大于 16 ~ 40mm 时， $R_{p0.2}$  允许降低 10N/mm<sup>2</sup>。

9. 高压化肥设备用无缝钢管钢的低温冲击性能 (表 14-96)

表 14-96 高压化肥设备用无缝钢管钢的低温冲击性能 (GB 6479—2000)

牌 号	试验温度 /℃	试样方向	试样尺寸/mm	
			10 × 10 × 55	5 × 10 × 55
			冲击吸收功 $A_{KV}/J$	
10	-20	纵向	≥18	≥12
20				
16Mn	-40		≥21	≥14

注：外径不小于 57mm，且壁厚不小于 14mm 时，应作标准尺寸试样的冲击试验，外径不小于 49mm，且壁厚不小于 8mm 时，应作宽度为 5mm 的小尺寸试样的冲击试验。

10. 高压锅炉用无缝钢管的力学性能 (表 14-97)

表 14-97 高压锅炉用无缝钢管的力学性能 (GB 5310—2008)

序号	牌 号	拉伸性能				冲击吸收 能量 $KV_2/J$		硬 度		
		抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	下屈服强度 或规定非比 例延伸强度 $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A(\%)$		纵向	横向	HBW	HV	HRB
				纵向	横向					
1	20G	410 ~ 550	245	24	22	40	27	—	—	—
2	20MnG	415 ~ 560	240	22	20	40	27	—	—	—
3	25MnG	485 ~ 640	275	20	18	40	27	—	—	—
4	15MoG	450 ~ 600	270	22	20	40	27	—	—	—
5	20MoG	415 ~ 665	220	22	20	40	27	—	—	—
6	12CrMoG	410 ~ 560	205	21	19	40	27	—	—	—
7	15CrMoG	440 ~ 640	295	21	19	40	27	—	—	—
8	12Cr2MoG	450 ~ 600	280	22	20	40	27	—	—	—
9	12Cr1MoVG	470 ~ 640	255	21	19	40	27	—	—	—
10	12Cr2MoWVTiB	540 ~ 735	345	18	—	40	—	—	—	—
11	07Cr2MoW2VNbB	$\geq 510$	400	22	18	40	27	220	230	97
12	12Cr3MoVSiTiB	610 ~ 805	440	16	—	40	—	—	—	—
13	15Ni1MnMoNbCu	620 ~ 780	440	19	17	40	27	—	—	—
14	10Cr9Mo1 VNbN	$\geq 585$	415	20	16	40	27	250	265	25HRC
15	10Cr9MoW2VNbBN	$\geq 620$	440	20	16	40	27	250	265	25HRC
16	10Cr11MoW2VNbCu1BN	$\geq 620$	400	20	16	40	27	250	265	25HRC
17	11Cr9Mo1 W1 VNbBN	$\geq 620$	440	20	16	40	27	238	250	23HRC
18	07Cr19Ni10	$\geq 515$	205	35	—	—	—	192	200	90
19	10Cr18Ni9NbCu3BN	$\geq 590$	235	35	—	—	—	219	230	95
20	07Cr25Ni21NbN	$\geq 655$	295	30	—	—	—	256	—	100
21	07Cr19Ni11Ti	$\geq 515$	205	35	—	—	—	192	200	90
22	07Cr18Ni11Nb	$\geq 520$	205	35	—	—	—	192	200	90
23	08Cr18Ni11NbFG	$\geq 550$	205	35	—	—	—	192	200	90

14.4.2 焊接钢管的力学性能

1. 直缝电焊钢管的力学性能（表 14-98）

表 14-98 直缝电焊钢管的力学性能（GB/T 13793—2008）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
	$\geq$		
08、10	195	315	22
15	215	355	20
20	235	390	19
Q195	195	315	22
Q215A、Q215B	215	335	22
Q235A、Q235B、Q235C	235	375	20
Q295A、Q295B	295	390	18
Q345A、Q345B、Q345C	345	470	18

2. 特殊要求的直缝电焊钢管的力学性能（表 14-99）

表 14-99 特殊要求的直缝电焊钢管的力学性能（GB/T 13793—2008）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
	$\geq$		
08、10	205	375	13
15	225	400	11
20	245	440	9
Q195	205	335	14
Q215A、Q215B	225	355	13
Q235A、Q235B、Q235C	245	390	9
Q295A、Q295B	—	—	—
Q345A、Q345B、Q345C	—	—	—

3. 直缝电焊钢管焊缝的抗拉强度（表 14-100）

表 14-100 直缝电焊钢管焊缝的抗拉强度（GB/T 13793—2008）

牌 号	焊缝抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	牌 号	焊缝抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$
08、10	315	Q215A、Q215B	335
15	355	Q235A、Q235B、Q235C	375
20	390	Q295A、Q295B	390
Q195	315	Q345A、Q345B、Q345C	470



## 4. 结构用高强度耐候焊接钢管的力学性能 (表 14-101)

表 14-101 结构用高强度耐候焊接钢管的力学性能 (YB/T 4112—2002)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
	$\geq$		
Q300GNH	400	300	16
Q325GNH	450	325	16
Q355GNH	500	355	15

注：表中断后伸长率不适用于外径小于或等于 40mm 的焊管，如用户需要时，可按供需双方协商。

## 5. 换热器用焊接钢管的力学性能 (表 14-102)

表 14-102 换热器用焊接钢管的力学性能 (YB 4103—2000)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
10	335 ~ 475	$\geq 195$	$\geq 28$

## 6. 深井水泵用电焊钢管的力学性能 (表 14-103)

表 14-103 深井水泵用电焊钢管的力学性能 (YB/T 4028—2005)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
Q195	315	195	20
Q215A、Q215B	335	215	20
Q235A、Q235B	375	235	20

注：拉伸试验仲裁时以纵向试样为准。

## 14.4.3 无缝钢管的力学性能

## 1. 钻探用无缝钢管的力学性能 (表 14-104)

表 14-104 钻探用无缝钢管的力学性能 (GB/T 9808—2008)

序号	钢级	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$		
1	ZT380	640	380	14
2	ZT490	690	490	12
3	ZT520	780	520	15
4	ZT540	740	540	12
5	ZT590	770	590	12
6	ZT640	790	640	12
7	ZT740	840	740	10

注：1. 钢级 ZT520 测量  $R_{p0.5}$ 。

2. 钢级 ZT520 拉伸试样采用 GB/T 228 中的 S4、S5 或 S6。

2. 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的力学性能（表 14-105）

表 14-105 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的力学性能（YB/T 4173—2008）

序号	牌 号	纵向力学性能				横向力学性能			
		抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长 率 A (%)	冲击 吸收 功 $A_{KV}$ /J	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长 率 A (%)	冲击 吸收 功 $A_{KV}$ /J
1	20G	410 ~ 550	≥245	≥24	≥40	410 ~ 550	≥245	≥22	≥27
2	20MnG	415 ~ 560	≥240	≥22	≥40	415 ~ 560	≥240	≥20	≥27
3	25MnG	485 ~ 640	≥275	≥20	≥40	485 ~ 640	≥275	≥18	≥27
4	12CrMoG	410 ~ 560	≥205	≥21	≥40	410 ~ 560	≥205	≥19	≥27
5	15CrMoG	440 ~ 640	≥295	≥21	≥40	440 ~ 640	≥295	≥19	≥27
6	12Cr2MoG	450 ~ 600	≥280	≥22	≥40	450 ~ 600	≥280	≥20	≥27
7	12Cr1MoVG	470 ~ 640	≥255	≥21	≥40	470 ~ 640	≥255	≥19	≥27
8	07Cr2MoW2VNbB	≥510	≥400	≥22	≥40	≥510	≥400	≥18	≥27
9	15Ni1MnMoNbCu	620 ~ 780	≥440	≥19	≥40	620 ~ 780	≥440	≥17	≥27
10	10Cr9Mo1VNbN	≥585	≥415	≥20	≥40	≥585	≥415	≥16	≥27
11	10Cr9MoW2VNbBN	≥620	≥440	≥20	≥40	≥620	≥440	≥16	≥27
12	10Cr11MoW2VNbCu1BN	≥620	≥400	≥20	≥40	≥620	≥400	≥16	≥27
13	11Cr9Mo1W1VNbBN	≥620	≥440	≥20	≥40	≥620	≥440	≥16	≥27

3. 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的硬度（表 14-106）

表 14-106 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的硬度（YB/T 4173—2008）

牌 号	硬度 ≤	
	HBW	HRC 或 HRB
07Cr2MoW2VNbB	220	97HRB
10Cr9Mo1VNbN	250	25HRC
10Cr9MoW2VNbBN	250	25HRC
10Cr11MoW2VNbCu1BN	250	25HRC
11Cr9Mo1W1VNbBN	238	23HRC

4. 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的高温规定非比例延伸强度（表 14-107）

表 14-107 高温用锻造镗孔厚壁无缝钢管的高温规定非比例延伸强度（YB/T 4173—2008）

序号	牌 号	温度/℃										
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
		规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$										
1	20G	—	—	215	196	177	157	137	98	49	—	—
2	20MnG	219	214	208	197	183	175	168	156	151	—	—
3	25MnG	252	245	237	226	210	201	192	179	172	—	—
4	12CrMoG	193	187	181	175	170	165	159	150	140	—	—
5	15CrMoG	—	—	269	256	242	228	216	205	198	—	—
6	12Cr2MoG	192	188	186	185	185	185	185	181	173	159	—
7	12Cr1MoVG	—	—	—	—	230	225	219	211	201	187	—
8	07Cr2MoW2VNbB	379	371	363	361	359	352	345	338	330	299	266
9	15Ni1MnMoNbCu	422	412	402	392	382	373	343	304	—	—	—
10	10Cr9Mo1VNbN	384	378	377	377	376	371	358	337	306	260	198
11	10Cr9MoW2VNbBN	619	610	593	577	564	548	528	504	471	414	355
12	10Cr11MoW2VNbCu1BN	618	603	586	574	562	550	533	511	478	434	374
13	11Cr9Mo1W1VNbBN	413	396	384	377	373	368	362	348	326	295	256

注：表中所列牌号 10Cr9MoW2VNbBN 和 10Cr11MoW2VNbCu1BN 的数据为材料在该温度下的抗拉强度。

5. 输送流体用无缝钢管的力学性能（表 14-108）

表 14-108 输送流体用无缝钢管的力学性能（GB/T 8163—2008）

牌号	质量等级	拉伸性能					冲击试验	
		抗拉强度 $R_m/$ $(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}^{\text{①}}/(N/mm^2)$			断后伸长率 $A(\%)$	温度 /℃	冲击吸收 能量 $KV_2/J$
			壁厚/mm					
			≤16	>16 ~ 30	>30			
			≥					
10	—	335 ~ 475	205	195	185	24	—	—
20	—	410 ~ 530	245	235	225	20	—	—
Q295	A	390 ~ 570	295	275	255	22	—	—
	B						+20	34

(续)

牌号	质量等级	拉伸性能					冲击试验	
		抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ <sup>①</sup> / (N/mm <sup>2</sup> )			断后伸 长率 A (%)	温度 /℃	冲击吸收 能量 KV <sub>2</sub> /J
			壁厚/mm					
			≤16	>16 ~ 30	>30			
			≥					
Q345	A	470 ~ 630	345	325	295	20	—	—
	B						+20	34
	C					21	0	
	D						-20	
	E						-40	27
Q390	A	490 ~ 650	390	370	350	18	—	—
	B						+20	34
	C					19	0	
	D						-20	
	E						-40	27
Q420	A	520 ~ 680	420	400	380	18	—	—
	B						+20	34
	C					19	0	
	D						-20	
	E						-40	27
Q460	C	550 ~ 720	460	440	420	17	0	34
	D						-20	
	E						-40	27

① 拉伸试验时，如不能测定屈服强度，可测定规定非比例延伸强度  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eL}$ 。

6. 核电站用无缝钢管钢的室温拉伸性能（表 14-109）

表 14-109 核电站用无缝钢管钢的室温拉伸性能（GB 24512.1—2009）

序号	牌号	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度或规定非比例延伸强度 $R_{eL}$ 或 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A$ (%) ≥	
				纵向	横向
1	HD245	410 ~ 550	245	24	22
2	HD245Cr	410 ~ 550	245	24	22
3	HD265	410 ~ 570	265	23	21
4	HD265Cr	410 ~ 570	265	23	21
5	HD280	470 ~ 590	275	21	21
6	HD280Cr	470 ~ 590	275	21	21

注：实测抗拉强度和断后伸长率还应符合： $R_m(A-2) > 10500$ 。

7. 核电站用无缝钢管钢的高温拉伸性能 (表 14-110)

表 14-110 核电站用无缝钢管钢的高温拉伸性能 (GB 24512. 1—2009)

序号	牌号	试验温度/℃	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$
1	HD245	250	—	170
		300	—	149
2	HD245Cr	250	—	170
		300	—	149
3	HD265	300	369	154
4	HD265Cr	300	369	154
5	HD280	300	423	186
6	HD280Cr	300	423	186

8. 核电站用无缝钢管钢的夏比 V 形缺口冲击吸收能量 (表 14-111)

表 14-111 核电站用无缝钢管钢的夏比 V 形缺口  
冲击吸收能量 (GB 24512. 1—2009)

序号	牌号	冲击吸收能量 $KV_2/J \geq$			
		0℃		-20℃	
		纵向	横向	纵向	横向
1	HD245	40	28	—	—
2	HD245Cr	40	28	—	—
3	HD265	40	28	—	—
4	HD265Cr	40	28	—	—
5	HD280	60	60	60	60
6	HD280Cr	60	60	60	60

9. 冷拔或冷轧精密无缝钢管的力学性能 (表 14-112)

表 14-112 冷拔或冷轧精密无缝钢管的力学性能 (GB/T 3639—2009)

牌号	交货状态											
	+C <sup>①</sup>		+LC <sup>①</sup>		+SR			+A <sup>②</sup>		+N		
	$R_m/$	A	$R_m/$	A	$R_m/$	$R_{eH}/$	A	$R_m/$	A	$R_m/$	$R_{eH}^{③}/$	A
	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)
$\geq$												
10	430	8	380	10	400	300	16	335	24	320~450	215	27
20	550	5	520	8	520	375	12	390	21	440~570	255	21

(续)

牌号	交货状态											
	+ C <sup>①</sup>		+ LC <sup>①</sup>		+ SR			+ A <sup>②</sup>		+ N		
	$R_m/$	$A$	$R_m/$	$A$	$R_m/$	$R_{eH}/$	$A$	$R_m/$	$A$	$R_m/$	$R_{eH}^{③}/$	$A$
	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)
	≥											
35	590	5	550	7	—	—	—	510	17	≥460	280	21
45	645	4	630	6	—	—	—	590	14	≥540	340	18
Q345B	640	4	580	7	580	450	10	450	22	490 ~ 630	355	22

注： $R_m$  表示抗拉强度， $R_{eH}$  表示上屈服强度， $A$  表示断后伸长率。

① 受冷加工变形程度的影响，屈服强度非常接近抗拉强度，因此，推荐下列关系式计算：+ C 状态：

$R_{eH} \geq 0.8R_m$ ；+ LC 状态： $R_{eH} \geq 0.7R_m$ 。

② 推荐下列关系式计算： $R_{eH} \geq 0.5R_m$ 。

③ 外径不大于 30mm 且壁厚不大于 3mm 的钢管，其最小上屈服强度可降低 10N/mm<sup>2</sup>。

10. 汽车半轴套用无缝钢管的力学性能（表 14-113）

表 14-113 汽车半轴套用无缝钢管的力学性能（YB/T 5035—1996）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
45	≥590	≥335	≥14	—
45Mn2	—	—	—	217 ~ 269
40Cr	—	—	—	217 ~ 269
20CrNi3A	—	—	—	217 ~ 269

14.4.4 异型钢管的力学性能

1. 冷拔异型钢管的力学性能（表 14-114）

表 14-114 冷拔异型钢管的力学性能（GB/T 3094—2000）

序 号	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
		≥		
1	10	335	205	24
2	20	390	245	20
3	35	510	305	17
4	45	590	335	14

(续)

序 号	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
		$\geq$		
5	Q195	315	195	22
6	Q215	335	215	22
7	Q235	375	235	20
8	Q295	430	295	22
9	Q345	510	345	21
10	Q390	530	390	18

2. 建筑结构用冷弯矩形钢管的力学性能 (表 14-115)

表 14-115 建筑结构用冷弯矩形钢管的力学性能 (JG/T 178—2005)

产品屈服 强度等级	壁厚 /mm	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	(常温)冲击吸 收功 $A_K/J \geq$
235	4 ~ 12	235	375	23	—
	> 12 ~ 22				27
345	4 ~ 12	345	470	21	—
	> 12 ~ 22				27
390	4 ~ 12	390	490	19	—
	> 12 ~ 22				27

14.4.5 合金钢钢管的力学性能 (表 14-116)

表 14-116 合金钢钢管的力学性能 (GB/T 8162—2008)

序号	牌 号	推荐的热处理制度 <sup>①</sup>					拉 伸 性 能			钢管退火或 高温回火交 货状态布氏 硬度 HBW
		淬火(正火)			回火		抗拉 强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服 强度 <sup>②</sup> $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	
		温度/℃		冷却 介质	温度 /℃	冷却 介质				
		第一次	第二次							
1	40Mn2	840	—	水、油	540	水、油	885	735	12	217
2	45Mn2	840	—	水、油	550	水、油	885	735	10	217
3	27SiMn	920	—	水	450	水、油	980	835	12	217



(续)

序号	牌 号	推荐的热处理制度 <sup>①</sup>					拉 伸 性 能			钢管退火或 高温回火交 货状态布氏 硬度 HBW
		淬火(正火)			回火		抗拉 强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服 强度 <sup>②</sup> $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	
		温度/℃		冷却 介质	温度 /℃	冷却 介质				
		第一次	第二次							
4	40MnB <sup>③</sup>	850	—	油	500	水、油	980	785	10	207
5	45MnB <sup>③</sup>	840	—	油	500	水、油	1030	835	9	217
6	20Mn2B <sup>③④</sup>	880	—	油	200	水、空	980	785	10	187
7	20Cr <sup>④⑤</sup>	880	800	水、油	200	水、空	835	540	10	179
							785	490	10	179
8	30Cr	860	—	油	500	水、油	885	685	11	187
9	35Cr	860	—	油	500	水、油	930	735	11	207
10	40Cr	850	—	油	520	水、油	980	785	9	207
11	45Cr	840	—	油	520	水、油	1030	835	9	217
12	50Cr	830	—	油	520	水、油	1080	930	9	229
13	38CrSi	900	—	油	600	水、油	980	835	12	255
14	12CrMo	900	—	空	650	空	410	265	24	179
15	15CrMo	900	—	空	650	空	440	295	22	179
16	20CrMo <sup>④⑤</sup>	880	—	水、油	500	水、油	885	685	11	197
							845	635	12	197
17	35CrMo	850	—	油	550	水、油	980	835	12	229
18	42CrMo	850	—	油	560	水、油	1080	930	12	217
19	12CrMoV	970	—	空	750	空	440	225	22	241
20	12Cr1MoV	970	—	空	750	空	490	245	22	179
21	38CrMoAl <sup>⑤</sup>	940	—	水、油	640	水、油	980	835	12	229
							930	785	14	229
22	50CrVA	860	—	油	500	水、油	1275	1130	10	255
23	20CrMn	850	—	油	200	水、空	930	735	10	187
24	20CrMnSi <sup>④</sup>	880	—	油	480	水、油	785	635	12	207
25	30CrMnSi <sup>④⑤</sup>	880	—	油	520	水、油	1080	885	8	229
							980	835	10	229
26	35CrMnSiA <sup>③</sup>	880	—	油	230	水、空	1620	—	9	229
27	20CrMnTi <sup>④⑥</sup>	880	870	油	200	水、空	1080	835	10	217

(续)

序号	牌 号	推荐的热处理制度 <sup>①</sup>					拉 伸 性 能			钢管退火或 高温回火交 货状态布氏 硬度 HBW
		淬火(正火)			回火		抗拉 强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	下屈服 强度 <sup>②</sup> $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	
		温度/℃		冷却 介质	温度 /℃	冷却 介质				
		第一次	第二次							
28	30CrMnTi <sup>④⑥</sup>	880	850	油	200	水、空	1470	—	9	229
29	12CrNi2	860	780	水、油	200	水、空	785	590	12	207
30	12CrNi3	860	780	油	200	水、空	930	685	11	217
31	12Cr2Ni4	860	780	油	200	水、空	1080	835	10	269
32	40CrNiMoA	850	—	油	600	水、油	980	835	12	269
33	45CrNiMoVA	860	—	油	460	油	1470	1325	7	269

- ① 表中所列热处理温度允许调整范围：淬火温度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ，低温回火温度 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ ，高温回火温度 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 。
- ② 拉伸试验时，如不能测定屈服强度，可测定规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替 $R_{eL}$ 。
- ③ 含硼钢在淬火前可先正火，正火温度应不高于其淬火温度。
- ④ 于 $280^{\circ}\text{C} \sim 320^{\circ}\text{C}$ 等温淬火。
- ⑤ 按需方指定的一组数据交货，当需方未指定时，可按其中任一组数据交货。
- ⑥ 含铬锰钛钢第一次淬火可用正火代替。

14.4.6 优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢管的力学性能（表 14-117）

表 14-117 优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢管的力学性能（GB/T 8162—2008）

牌号	质量等级	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}^{①}/(N/mm^2)$			断后 伸长率 $A(\%)$	冲击试验	
			壁厚/mm				温度/℃	吸收能量 $KV_2/J$
			≤16	>16 ~ 30	>30			
			≥					
10	—	≥335	205	195	185	24	—	—
15	—	≥375	225	215	205	22	—	—
20	—	≥410	245	235	225	20	—	—
25	—	≥450	275	265	255	18	—	—
35	—	≥510	305	295	285	17	—	—
45	—	≥590	335	325	315	14	—	—
20Mn	—	≥450	275	265	255	20	—	—

(续)

牌号	质量等级	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	下屈服强度 $R_{eL}^{①}/(N/mm^2)$			断后 伸长率 $A(\%)$	冲击试验	
			壁厚/mm				温度/℃	吸收能量 $KV_2/J$
			≤16	>16 ~ 30	>30			
			≥					
25Mn	—	≥490	295	285	275	18	—	—
Q235	A	375 ~ 500	235	225	215	25	—	27
	B						+20	
	C						0	
	D						-20	
Q275	A	415 ~ 540	275	265	255	22	—	27
	B						+20	
	C						0	
	D						-20	
Q295	A	390 ~ 570	295	275	255	22	—	—
	B						+20	34
Q345	A	470 ~ 630	345	325	295	20	—	—
	B						+20	
	C					21	0	34
	D						-20	
	E						-40	
Q390	A	490 ~ 650	390	370	350	18	—	—
	B						+20	
	C					19	0	34
	D						-20	
	E						-40	
Q420	A	520 ~ 680	420	400	380	18	—	—
	B						+20	
	C					19	0	34
	D						-20	
	E						-40	
Q460	C	550 ~ 720	460	440	420	17	0	34
	D						-20	
	E						-40	27

① 拉伸试验时，如不能测定屈服强度，可测定规定非比例延伸强度  $R_{p0.2}$  代替  $R_{eL}$ 。

14.5 盘条和钢筋的力学性能

14.5.1 盘条的力学性能

1. 低碳钢热轧圆盘条的力学性能（表 14-118）

表 14-118 低碳钢热轧圆盘条的力学性能（GB/T 701—2008）

牌 号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \leq$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%) \geq$	冷弯试验 $180^\circ$ $d$ —弯心直径 $a$ —试样直径
Q195	410	30	$d=0$
Q215	435	28	$d=0$
Q235	500	23	$d=0.5a$
Q275	540	21	$d=1.5a$

2. 制丝用非合金沸腾钢及沸腾钢替代品低碳钢盘条抗拉强度（表 14-119）

表 14-119 制丝用非合金沸腾钢及沸腾钢替代品低碳  
钢盘条抗拉强度（YB/T 170.3—2002）

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$
C2D1	$\leq 360$
C3D1	$\leq 390$
C4D1	供需双方协商

3. 预应力钢丝及钢绞线用热轧盘条的力学性能（表 14-120）

表 14-120 预应力钢丝及钢绞线用热轧盘条的力学性能（YB/T 146—1998）

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断面收缩率 $Z(\%)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断面收缩率 $Z(\%)$
	直径 8.0 ~ 10.0mm		直径 10.5 ~ 13.0mm	
72A	960 ~ 1080	$\geq 25$	940 ~ 1060	$\geq 25$
72MnA 75A	990 ~ 1110		970 ~ 1090	
75MnA 77A	1020 ~ 1140		1000 ~ 1120	
77MnA 80A	1040 ~ 1160		1020 ~ 1140	
80MnA 82A	1060 ~ 1180		1040 ~ 1160	
82MnA	1080 ~ 1200		1060 ~ 1180	

14.5.2 钢筋的力学性能

1. 冷轧扭钢筋的力学性能（表 14-121）

表 14-121 冷轧扭钢筋的力学性能（JG 190—2006）

强度级别	型号	抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 (%)	180°弯曲试验 (弯心直径 = $3d$ )	应力松弛率(%)	
					10h	1000h
CTB550	I	$\geq 550$	$A_{11.3} \geq 4.5$	受弯曲部位钢筋 表面不得产生裂纹	—	—
	II	$\geq 550$	$A \geq 10$		—	—
	III	$\geq 550$	$A \geq 12$		—	—
CTB650	III	$\geq 650$	$A_{100mm} \geq 4$		$\leq 5$	$\leq 8$

注：1.  $d$  为冷轧扭钢筋标志直径。  
2.  $A$ 、 $A_{11.3}$  分别表示以标距  $5.65 \sqrt{S_0}$  或  $11.3 \sqrt{S_0}$  ( $S_0$  为试样原始截面面积) 的试样拉断伸长率， $A_{100mm}$  表示标距为 100mm 的试样拉断伸长率。

2. 钢筋的力学性能（表 14-122）

表 14-122 钢筋的力学性能（GB 13788—2008）

牌号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / ( $N/mm^2$ ) $\geq$	抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ ) $\geq$	断后伸长率 (%) $\geq$		弯曲试验 180℃	反复弯 曲次数	应力松弛初始应力 相当于公称抗 拉强度的 70%
			$A_{11.3}$	$A_{100mm}$			1000h 松弛率(%) $\leq$
CRB550	500	550	8.0	—	$D = 3d$	—	—
CRB650	585	650	—	4.0	—	3	8
CRB800	800	800	—	4.0	—	3	8
CRB970	970	970	—	4.0	—	3	8

注：表中  $D$  为弯心直径， $d$  为钢筋公称直径。

3. 钢筋混凝土用余热处理钢筋的力学性能（表 14-123）

表 14-123 钢筋混凝土用余热处理钢筋的力学性能（GB 13014—1991）

表面 形状	钢筋级别	强度等 级代号	公称直径/ mm	下屈服强度 $R_{eL}$ / ( $N/mm^2$ )	抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A$ (%)
				$\geq$		
月牙肋	III	KL400	8 ~ 25 28 ~ 40	440	600	14

4. 钢筋混凝土用热轧带肋钢筋的力学性能（表 14-124）

表 14-124 钢筋混凝土用热轧带肋钢筋的力学性能（GB 1499.2—2007）

牌 号	下屈服强度 $R_{eL}$ $/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	最大力下总伸长率 $A_{gt}(\%)$
	$\geq$			
HRB335 HRBF335	335	455	17	7.5
HRB400 HRBF400	400	540	16	
HRB500 HRBF500	500	630	15	

5. 预应力混凝土用螺纹钢筋的力学性能（表 14-125）

表 14-125 预应力混凝土用螺纹钢筋的力学性能（GB/T 20065—2006）

级别	下屈服强度 $R_{eL}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	最大力下总伸长 率 $A_{gt}(\%)$	应力松弛性能	
	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	初始应力	1000h 后应力 松弛率(%)
					$0.8R_{eL}$	$\leq 3$
PSB785	785	980	7	3.5	$0.8R_{eL}$	$\leq 3$
PSB830	830	1030	6			
PSB930	930	1080	6			
PSB1080	1080	1230	6			

注：无明显屈服时，用规定非比例延伸强度  $R_{p0.2}$  代替。

14.6 钢棒和钢丝的力学性能

14.6.1 钢棒的力学性能

1. 内燃机气阀用钢及合金棒材的交货状态及硬度（表 14-126）

表 14-126 内燃机气阀用钢及合金棒材的交货状态及硬度（GB/T 12773—2008）

序号	类别	牌 号	交货状态	硬度 HBW
1	马氏体型	40Cr10Si2Mo	退火	$\leq 269$
			调质	协商

(续)

序号	类别	牌 号	交货状态	硬度 HBW
2	马氏体型	42Cr9Si2	退火	≤269
			调质	协商
3		45Cr9Si3	退火	≤269
			调质	协商
4		51Cr8Si2	退火	≤269
			调质	协商
5		80Cr20Si2Ni	退火	≤321
			调质	协商
6		85Cr18Mo2V	退火	≤300
			调质	协商
7		86Cr18W2VRe	退火	≤300
			调质	协商
8	奥氏体型	20Cr21Ni12N	固溶	≤300
9		33Cr23Ni8Mn3N	固溶	≤360
10		45Cr14Ni14W2Mo	固溶	≤295
11		50Cr21Mn9Ni4Nb2WN	固溶	≤385
12		53Cr21Mn9Ni4N	固溶	≤380
13		55Cr21Mn8Ni2N	固溶	≤385
14		61Cr21Mn10Mo1V1Nb1N	固溶	≤385
15		GH4751	固溶	≤325
16		GH4080A	固溶	≤325

2. 内燃机气阀用钢及合金棒材的室温力学性能（表 14-127）

表 14-127 内燃机气阀用钢及合金棒材的室温力学性能（GB/T 12773—2008）

序号	类别	牌 号	热处理制度	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸 长率 A (%) ≥	断面收 缩率 Z (%) ≥	硬度	
								HBW	HRC
1	马氏体型	40Cr10Si2Mo	1000 ~ 1050℃ 油冷 + 700 ~ 780℃ 空冷	680	880	10	35	266 ~ 325	—



(续)

序号	类别	牌 号	热处理制度	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸 长率 $A$ (%) $\geq$	断面收 缩率 $Z$ (%) $\geq$	硬度	
								HBW	HRC
2	马氏体型	42Cr9Si2	1000 ~ 1050℃ 油冷 + 700 ~ 780℃ 空冷	590	880	19	50	266 ~ 325	—
3		45Cr9Si3	1000 ~ 1050℃ 油冷 + 720 ~ 820℃ 空冷	700	900	14	40	266 ~ 325	—
4		51Cr8Si2	1000 ~ 1050℃ 油冷 + 650 ~ 750℃ 空冷	685	885	14	35	$\geq 260$	—
5		80Cr20Si2Ni	1030 ~ 1080℃ 油冷 + 700 ~ 800℃ 空冷	680	880	10	15	$\geq 295$	—
6		85Cr18Mo2V	1050 ~ 1080℃ 油冷 + 700 ~ 820℃ 空冷	800	1000	7	12	290 ~ 325	—
7		86Cr18W2VRe	1050 ~ 1080℃ 油冷 + 700 ~ 820℃ 空冷	800	1000	7	12	290 ~ 325	—
8	奥氏体型	20Cr21Ni12N	1100 ~ 1200℃ 固溶 + 700 ~ 800℃ 空冷	430	820	26	20	—	—
9		33Cr23Ni8Mn3N	1150 ~ 1200℃ 固溶 + 780 ~ 820℃ 空冷	550	850	20	30	—	$\geq 25$
10		45Cr14Ni14W2Mo	1100 ~ 1200℃ 固溶 + 720 ~ 800℃ 空冷	395	785	25	35	—	—
11		50Cr21Mn9Ni4Nb2 WN	1160 ~ 1200℃ 固溶 + 760 ~ 850℃ 空冷	580	950	12	15	—	$\geq 28$
12		53Cr21Mn9Ni4N	1140 ~ 1200℃ 固溶 + 760 ~ 815℃ 空冷	580	950	8	10	—	$\geq 28$
13		55Cr21Mn8Ni2N	1140 ~ 1180℃ 固溶 + 760 ~ 815℃ 空冷	550	900	8	10	—	$\geq 28$
14		61Cr21Mn10Mo1 VINb1N	1100 ~ 1200℃ 固溶 + 720 ~ 800℃ 空冷	800	1000	8	10	—	$\geq 32$
15		GH4751	1100 ~ 1150℃ 固溶 + 840℃ × 24h 空冷 + 700℃ × 2h 空冷	750	1100	12	20	—	$\geq 32$
16		GH4080A	1000 ~ 1080℃ 固溶 + 690 ~ 710℃ × 16h 空冷	725	1100	15	25	—	$\geq 32$

3. 内燃机气阀用钢及合金棒材的高温短时抗拉强度（表 14-128）

表 14-128 内燃机气阀用钢及合金棒材的高温短时抗拉强度（GB/T 12773—2008）

序号	牌 号	热处理状态	高温短时抗拉强度/( N/mm <sup>2</sup> )						
			500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	750℃	800℃
马氏体钢									
1	40Cr10Si2Mo	淬火 + 回火	550	420	300	220	( 130 )	—	—
2	42Cr9Si2	淬火 + 回火	500	360	240	160	—	—	—
3	45Cr9Si3	淬火 + 回火	500	360	250	170	( 110 )	—	—
4	51Cr8Si2	淬火 + 回火	500	360	230	160	( 105 )	—	—
5	80Cr20Si2Ni	淬火 + 回火	550	400	300	230	180	—	—
6	85Cr18Mo2V	淬火 + 回火	550	400	300	230	180	( 140 )	—
7	86Cr18W2VRe	淬火 + 回火	550	400	300	230	180	( 140 )	—
奥氏体钢									
8	20Cr21Ni12N	固溶 + 时效	600	550	500	440	370	300	240
9	33Cr23Ni8Mn3N	固溶 + 时效	600	570	530	470	400	340	280
10	45Cr14Ni14W2Mo	固溶 + 时效	600	550	500	410	350	270	180
11	50Cr21Mn9Ni4Nb2WN	固溶 + 时效	680	650	610	550	480	410	340
12	53Cr21Mn9Ni4N	固溶 + 时效	650	600	550	500	450	370	300
13	55Cr21Mn8Ni2N	固溶 + 时效	640	590	540	490	440	360	290
14	61Cr21Mn10Mo1V1Nb1N	固溶 + 时效	800	780	750	680	600	500	400
高温合金									
15	GH4751	固溶 + 时效	1000	980	930	850	770	650	510
16	GH4080A	固溶 + 时效	1050	1030	1000	930	820	680	500

注：表中数值在括号中列出时，表明该材料不推荐在此温度条件下使用。

4. 内燃机气阀用钢及合金棒材的高温短时屈服强度（表 14-129）

表 14-129 内燃机气阀用钢及合金棒材的高温短时屈服强度（GB/T 12773—2008）

序号	牌 号	热处理状态	高温短时屈服强度/(N/mm <sup>2</sup> )						
			500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	750℃	800℃
	马氏体钢								
1	40Cr10Si2Mo	淬火 + 回火	450	350	260	180	(100)	—	—
2	42Cr9Si2	淬火 + 回火	400	300	230	110	—	—	—
3	45Cr9Si3	淬火 + 回火	400	300	240	120	(80)	—	—
4	51Cr8Si2	淬火 + 回火	400	300	220	110	(75)	—	—
5	80Cr20Si2Ni	淬火 + 回火	500	370	280	170	120	—	—
6	85Cr18Mo2V	淬火 + 回火	500	370	280	170	120	(80)	—
7	86Cr18W2VRe	淬火 + 回火	500	370	280	170	120	(80)	—

(续)

序号	牌 号	热处理状态	高温短时屈服强度/(N/mm <sup>2</sup> )						
			500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	750℃	800℃
	奥氏体钢								
8	20Cr21Ni12N	固溶 + 时效	250	230	210	200	180	160	130
9	33Cr23Ni8Mn3N	固溶 + 时效	270	250	220	210	190	180	170
10	45Cr14Ni14W2Mo	固溶 + 时效	250	230	210	190	170	140	100
11	50Cr21Mn9Ni4Nb2WN	固溶 + 时效	350	330	310	285	260	240	220
12	53Cr21Mn9Ni4N	固溶 + 时效	350	330	300	270	250	230	200
13	55Cr21Mn8Ni2N	固溶 + 时效	300	280	250	230	220	200	170
14	61Cr21Mn10Mo1V1Nb1N	固溶 + 时效	500	480	450	430	400	380	350
高温合金									
15	GH4751	固溶 + 时效	725	710	690	660	650	560	425
16	GH4080A	固溶 + 时效	700	650	650	600	600	500	450

注：表中数值在括号中列出时，表示该材料不推荐在此温度条件下使用。

14.6.2 钢丝的力学性能

1. 重要用途低碳钢丝的力学性能（表 14-130）

表 14-130 重要用途低碳钢丝的力学性能（YB/T 5032—2006）

公称直径/mm	抗拉强度/(N/mm <sup>2</sup> ) ≥		扭转次数/(次/360°) ≥	弯曲次数/(次/180°) ≥
	光面	镀锌		
0.30	395	365	30	打结拉伸试验抗拉强度： 光面：≥225N/mm <sup>2</sup> 镀锌：≥185N/mm <sup>2</sup>
0.40			30	
0.50			30	
0.60			30	
0.80			30	
1.00			25	22
1.20			25	18
1.40			20	14
1.60			20	12
1.80			18	12
2.00			18	10
2.30			15	10
2.60			15	8
3.00			12	10
3.50			12	10
4.00			10	8
4.50			10	8
5.00			8	6
6.00			6	3

## 2. 板条拼装夹芯板用钢丝的力学性能 (表 14-131)

表 14-131 板条拼装夹芯板用钢丝的力学性能 (YB/T 126—1997)

钢丝直径/ mm	抗拉强度/(N/mm <sup>2</sup> )			反复弯曲次数/ (次/180°)
	A	B	C	
2.03	590 ~ 740	590 ~ 850	850 ~ 950	≥6

## 3. 阀门用铬钒弹簧钢丝的力学性能 (表 14-132)

表 14-132 阀门用铬钒弹簧钢丝的力学性能 (YB/T 5136—1993)

交货状态	力学性能	
	抗拉强度/(N/mm <sup>2</sup> )	硬度 HBW
	≤	
退火	784	240
冷拉	1029	306

## 4. 通信用镀锌低碳钢丝的力学性能和物理性能 (表 14-133)

表 14-133 通信用镀锌低碳钢丝的力学性能和物理性能 (GB/T 346—1984)

钢 丝 直 径		力 学 性 能		物 理 性 能	
公称直径 /mm	允许偏差 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{200mm}(\%)$	20℃时的电阻率/ $\times 10^{-6}\Omega \cdot m$	
				普通钢丝	含铜钢丝
1.2	+0.06 -0.04	355 ~ 540	$\geq 12$	$\leq 0.132$	$\leq 0.146$
1.5	+0.08 -0.04				
2.0					
2.5					
3.0					
4.0	+0.10 -0.06	355 ~ 490	$\geq 12$	$\leq 0.132$	$\leq 0.146$
5.0					
6.0					

## 5. 预应力混凝土用低合金钢丝拔丝用盘条的力学性能 (表 14-134)

表 14-134 预应力混凝土用低合金钢丝拔丝用盘条的力学性能 (YB/T 038—1993)

公称直径/mm	级 别	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
6.5	YD800	550	23
9.0	YD1000	750	15
10.0	YD1200	900	$7(A_{11.3})$

6. 预应力混凝土用冷拉钢丝的力学性能（表 14-135）

表 14-135 预应力混凝土用冷拉钢丝的力学性能（GB/T 5223—2002）

公称直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	规定非比例伸长应力 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ $\geq$	最大力下总伸长率 $A_{gt}(L_0=200mm)$ $(\%) \geq$	弯曲次数/(次/ $180^\circ$ ) $\geq$	弯曲半径 $R/mm$	断面收缩率 $Z(\%)$ $\geq$	每 210mm 扭距的 扭转次数 $\geq$	初始应力相当于 70% 公称抗拉强度时, 1000h 后应力松弛率 $r(\%)$ $\leq$
3.00	1470	1100	1.5	4	7.5	—	—	8
4.00	1570	1180		4	10	35	8	
	1670	1250		4	15		8	
5.00	1770	1330		5	15	30	7	
6.00	1470	1100		5	20		6	
7.00	1570	1180		5	20		5	
	1670	1250		5	20		5	
8.00	1770	1330		5	20		5	

7. 预应力混凝土用消除应力光圆及螺旋肋钢丝的力学性能（表 14-136）

表 14-136 预应力混凝土用消除应力光圆及螺旋肋钢丝的力学性能（GB/T 5223—2002）

公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	规定非比例伸 长应力 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$ $\geq$		最大力下总 伸长率 $A_{gt}$ $(L_0=200mm)$ $(\%) \geq$	弯曲次 数/(次/ $180^\circ$ ) $\geq$	弯曲 半径 $R/mm$	应力松弛性能					
							初始应力相当 于公称抗拉强度 的百分数(%)	1000h 后应力松弛 率 $r(\%) \leq$				
								WLR <sup>①</sup>	WNR <sup>②</sup>			
		对所有规格										
4.00	1470	1290	1250	3.5	3	10	60	1.0	4.5			
	1570	1380	1330		4	15						
4.80	1670	1470	1410									
5.00	1770	1560	1500		4	15						
	1860	1640	1580									
6.00	1470	1290	1250		4	15	70	2.0	8			
6.25	1570	1380	1330									
	1670	1470	1410									
7.00	1770	1560	1500									
8.00	1470	1290	1250		4	20	80	4.5	12			
9.00	1570	1380	1330									
10.00										4	25	
12.00	1470	1290	1250		4	30						

① WLR 表示低松弛钢丝。  
② WNR 表示普通松弛钢丝。

8. 预应力混凝土用消除应力刻痕钢丝的力学性能（表 14-137）

表 14-137 预应力混凝土用消除应力刻痕钢丝的力学性能（GB/T 5223—2002）

公称 直径 /mm	抗拉 强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	规定非比例伸 长应力 $R_{p0.2}$ /( $N/mm^2$ ) $\geq$		最大力下总 伸长率 $A_{gt}$ ( $L_0=200mm$ ) (%) $\geq$	弯曲次 数/(次/ $180^\circ$ ) $\geq$	弯曲 半径 $R/mm$	应力松弛性能		
							初始应力相当 于公称抗拉强度 的百分数(%)	1000h 后应力松弛 率 $r(\%) \leq$	
		WLR	WNR					WLR	WNR
		对所有规格							
$\leq 5.0$	1470	1290	1250	3.5	3	15	60	1.5	4.5
	1570	1380	1330						
	1670	1470	1410						
	1770	1560	1500						
	1860	1640	1580						
$> 5.0$	1470	1290	1250	3.5	3	20	70	2.5	8
	1570	1380	1330						
	1670	1470	1410						
	1770	1560	1500						
	80						4.5	12	

9. 链式葫芦起重圆环链用钢丝的力学性能（表 14-138）

表 14-138 链式葫芦起重圆环链用钢丝的力学性能（YB/T 5211—1993）

牌 号	冷拉状态		退火状态	
	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	硬度 HBW	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	硬度 HBW
	$\leq$			
20Mn2	725	217	610	187
20MnV	725	217	610	187
23Mn2NiCrMoA	—	—	705	210
24Mn2NiCrMoA	—	—	705	210

## 第 15 章 不锈钢及耐热钢的力学性能

### 15.1 不锈钢的力学性能

#### 15.1.1 不锈钢钢板和钢带的力学性能

1. 以固溶处理的奥氏体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-1)

表 15-1 以固溶处理的奥氏体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A$ (%)	硬 度 值		
					HBW	HRB	HV
		$\geq$			$\leq$		
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	205	515	40	217	95	218
022Cr17Ni7	—	220	550	45	241	100	—
022Cr17Ni7N	—	240	550	45	241	100	—
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	205	515	40	201	92	210
12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9Si3	205	515	40	217	95	220
06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	205	515	40	201	92	210
022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	170	485	40	201	92	210
07Cr19Ni10	—	205	515	40	201	92	210
05Cr19Ni10Si2NbN	—	290	600	40	217	95	—
06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	240	550	30	201	92	220
06Cr19Ni9NbN	0Cr19Ni10NbN	345	685	35	250	100	260
022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	205	515	40	201	92	220
10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	170	485	40	183	88	200
06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	205	515	40	217	95	220
06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	205	515	40	217	95	220
022Cr25Ni22Mo2N	—	270	580	25	217	95	—
06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	205	515	40	217	95	220



(续)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A$ (%)	硬 度 值		
					HBW	HRB	HV
					≥		
022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	170	485	40	217	95	220
06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	205	515	40	217	95	220
06Cr17Ni12Mo2Nb	—	205	515	30	217	95	—
06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	240	550	35	217	95	220
022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	205	515	40	217	95	220
06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	205	520	40	187	90	200
015Cr21Ni26Mo5Cu2	—	220	490	35	—	90	—
06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	205	515	35	217	95	220
022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	205	515	40	217	95	220
022Cr19Ni16Mo5N	—	240	550	40	223	96	—
022Cr19Ni13Mo4N	—	240	550	40	217	95	—
06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	205	515	40	217	95	220
015Cr24Ni22Mo8Mn3CuN	—	430	750	40	250	—	—
022Cr24Ni17Mo5Mn6NbN	—	415	795	35	241	100	—
06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	205	515	40	201	92	210

2. H1/4 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能（表 15-2）

表 15-2 H1/4 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能（GB/T 3280—2007）

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)		
				厚度 <0.4mm	厚度 ≥0.4 ~ <0.8mm	厚度 ≥0.8mm
				≥		
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	515	860	25	25	25
022Cr17Ni7	—	515	825	25	25	25
022Cr17Ni7N	—	515	825	25	25	25
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	515	860	10	10	12
06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	515	860	10	10	12

(续)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A(%)		
				厚度 <0.4mm	厚度 ≥0.4 ~ <0.8mm	厚度 ≥0.8mm
				≥		
022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	515	860	8	8	10
06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	515	860	12	12	12
022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	515	860	10	10	12
06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	515	860	10	10	10
022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	515	860	8	8	8
06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	515	860	12	12	12

3. H1/2 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-3)

表 15-3 H1/2 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A(%)		
				厚度 <0.4mm	厚度 ≥0.4 ~ <0.8mm	厚度 ≥0.8mm
				≥		
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	760	1035	15	18	18
022Cr17Ni7	—	690	930	20	20	20
022Cr17Ni7N	—	690	930	20	20	20
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	760	1035	9	10	10
06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	760	1035	6	7	7
022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	760	1035	5	6	6
06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	760	1035	6	8	8
022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	760	1035	6	7	7
06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	760	1035	6	7	7
022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	760	1035	5	6	6
06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	760	1035	6	8	8

4. H 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-4)

表 15-4 H 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A(%)		
				厚度 <0.4mm	厚度 ≥0.4 ~ <0.8mm	厚度 ≥0.8mm
				≥		
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	930	1205	10	12	12
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	930	1205	5	6	6

5. H2 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-5)

表 15-5 H2 状态的不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A(%)		
				厚度 <0.4mm	厚度 ≥0.4 ~ <0.8mm	厚度 ≥0.8mm
				≥		
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	965	1275	8	9	9
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	965	1275	3	4	4

6. 经固溶处理的奥氏体-铁素体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-6)

表 15-6 经固溶处理的奥氏体-铁素体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A(%)	硬 度 值	
					HBW	HRC
					≤	
14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	—	715	25	—	—
022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	440	630	25	290	31
12Cr21Ni5Ti	1Cr21Ni5Ti	—	635	20	—	—
022Cr22Ni5Mo3N	—	450	620	25	293	31
022Cr23Ni5Mo3N	—	450	620	25	293	31
022Cr23Ni4MoCuN	—	400	600	25	290	31

(续)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度	抗拉强度	断后伸 长率	硬 度 值	
		$R_{p0.2}$	$R_m$	$A(\%)$	HBW	HRC
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$			
		$\geq$			$\leq$	
022Cr25Ni6Mo2N	—	450	640	25	295	31
022Cr25Ni7Mo4WCuN	—	550	750	25	270	—
03Cr25Ni6Mo3Cu2N	—	550	760	15	302	32
022Cr25Ni7Mo4N	—	550	795	15	310	32

7. 经退火处理的铁素体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-7)

表 15-7 经退火处理的铁素体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度	抗拉强度	断后 伸长率	冷弯 180°	硬 度 值		
		$R_{p0.2}$	$R_m$	$A(\%)$		HBW	HRB	HV
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$					
		$\geq$				$\leq$		
06Cr13Al	0Cr13Al	170	415	20	$d=2a$	179	88	200
022Cr11Ti	—	275	415	20	$d=2a$	197	92	200
022Cr11NbTi	—	275	415	20	$d=2a$	197	92	200
022Cr12Ni	—	280	450	18	—	180	88	—
022Cr12	00Cr12	195	360	22	$d=2a$	183	88	200
10Cr15	1Cr15	205	450	22	$d=2a$	183	89	200
10Cr17	1Cr17	205	450	22	$d=2a$	183	89	200
022Cr18Ti	00Cr17	175	360	22	$d=2a$	183	88	200
10Cr17Mo	1Cr17Mo	240	450	22	$d=2a$	183	89	200
019Cr18MoTi	—	245	410	20	$d=2a$	217	96	230
022Cr18NbTi	—	250	430	18	—	180	88	—
019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	275	415	20	$d=2a$	217	96	230
008Cr27Mo	00Cr27Mo	245	410	22	$d=2a$	190	90	200
008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	295	450	22	$d=2a$	209	95	220

注: 1 “—”表示目前尚无数据提供, 需在生产使用过程中积累数据。

2  $d$ —弯心直径;  $a$ —钢板厚度。

8. 经退火处理的马氏体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能（表 15-8）

表 15-8 经退火处理的马氏体型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能（GB/T 3280—2007）

新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例 延伸强度	抗拉强度	断后 伸长率	冷弯 180°	硬 度 值		
		$R_{p0.2}$	$R_m$	$A(\%)$		HBW	HRB	HV
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$					
			$\geq$			$\leq$		
12Cr12	1Cr12	205	485	20	$d=2a$	217	96	210
06Cr13	0Cr13	205	415	20	$d=2a$	183	89	200
12Cr13	1Cr13	205	450	20	$d=2a$	217	96	210
04Cr13Ni5Mo		620	795	15	—	302	32 <sup>①</sup>	—
20Cr13	2Cr13	225	520	18	—	223	97	234
30Cr13	3Cr13	225	540	18	—	235	99	247
40Cr13	4Cr13	225	590	15	—	—	—	—
17Cr16Ni2 <sup>②</sup>	—	690	880 ~ 1080	12	—	262 ~ 326	—	—
		1050	1350	10	—	388	—	—
68Cr17	1Cr12	245	590	15	—	255	25 <sup>①</sup>	269

注： $d$ —弯心直径； $a$ —钢板厚度。  
① 为 HRC 硬度值。  
② 表列为淬火、回火后的力学性能。

9. 经固溶处理的沉淀硬化型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能（表 15-9）

表 15-9 经固溶处理的沉淀硬化型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能  
(GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	钢材厚度/mm	规定非比例 延伸强度	抗拉强度	断后 伸长率	硬 度 值	
			$R_{p0.2}$	$R_m$	$A(\%)$	HRC	HBW
			$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$			
			$\leq$		$\geq$	$\leq$	
04Cr13Ni8Mo2Al	—	0 10 ~ <8 0	—	—	—	38	363
022Cr12Ni9Cu2NbTi	—	0 30 ~ 8 0	1105	1205	3	36	331
07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	0 10 ~ <0 30	450	1035	—	—	—
		0 30 ~ 8 0	380	1035	20	92 <sup>①</sup>	—
07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	0 10 ~ <8 0	450	1035	25	100 <sup>①</sup>	—
09Cr17Ni5Mo3N	—	0.10 ~ <0 30	585	1380	8	30	—
		0 30 ~ 8 0	585	1380	12	30	—
06Cr17Ni7AlTi	—	0 10 ~ <1 50	515	825	4	32	—
		1 50 ~ 8 0	515	825	5	32	—

① 为 HRB 硬度值。

# 10. 经沉淀硬化处理的沉淀硬化型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (表 15-10)

表 15-10 经沉淀硬化处理的沉淀硬化型不锈钢冷轧钢板和钢带的力学性能 (GB/T 3280—2007)

新 牌 号	旧 牌 号	钢材厚度 /mm	处理温度 /℃	非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	硬度值	
							HRC	HBW
				≥				
04Cr13Ni8Mo2Al	—	0.10 ~ <0.50	510 ± 6	1410	1515	6	45	—
		0.50 ~ <5.0		1410	1515	8	45	—
		5.0 ~ 8.0		1410	1515	10	45	—
		0.10 ~ <0.50	538 ± 6	1310	1380	6	43	—
		0.50 ~ <5.0		1310	1380	8	43	—
		5.0 ~ 8.0		1310	1380	10	43	—
022Cr12Ni9Cu2NbTi	—	0.10 ~ <0.50	510 ± 6 或 482 ± 6	1410	1525	—	44	—
		0.50 ~ <1.50		1410	1525	3	44	—
		1.50 ~ 8.0		1410	1525	4	44	—
07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	0.10 ~ <0.30	760 ± 15 加热 后冷至 15 ± 3, 再加热至 566 ± 6 后空 冷	1035	1240	3	38	—
		0.30 ~ <5.0		1035	1240	5	38	—
		5.0 ~ 8.0		965	1170	7	43	352
		0.10 ~ <0.30	954 ± 8 加热 后冷至 - 73 ± 6, 再加热 至 510 ± 6 后 空冷	1310	1450	1	44	—
		0.30 ~ <5.0		1310	1450	3	44	—
		5.0 ~ <8.0		1240	1380	6	43	401
07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	0.10 ~ <0.30	760 ± 15 加热 后冷至 15 ± 3, 再加热至 566 ± 6 后空 冷	1170	1310	3	40	—
		0.30 ~ <5.0		1170	1310	5	40	—
		5.0 ~ 8.0		1170	1310	4	40	375
		0.10 ~ <0.30	954 ± 8 加热 后冷至 - 73 ± 6, 再加热 至 510 ± 6 后 空冷	1380	1550	2	46	—
		0.30 ~ <5.0		1380	1550	4	46	—
		5.0 ~ 8.0		1380	1550	4	45	429
		0.10 ~ 1.2	冷轧	1205	1380	1	41	—
		0.10 ~ 1.2	冷轧 + 482	1580	1655	1	46	—

(续)

新 牌 号	旧 牌 号	钢材厚度 /mm	处理温度 /℃	非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	硬度值	
							HRC	HBW
				≥				
09Cr17Ni5Mo3N	—	0.10 ~ <0.30	455 ± 8	1035	1275	6	42	—
		0.30 ~ 5.0		1035	1275	8	42	—
		0.10 ~ <0.30	540 ± 8	1000	1140	6	36	—
		0.30 ~ 5.0		1000	1140	8	36	—
06Cr17Ni7AlTi	—	0.10 ~ <0.80	510 ± 8	1170	1310	3	39	—
		0.80 ~ <1.50		1170	1310	4	39	—
		1.50 ~ 8.0		1170	1310	5	39	—
		0.10 ~ <0.80	538 ± 8	1105	1240	3	37	—
		0.80 ~ <1.50		1105	1240	4	37	—
		1.50 ~ 8.0		1105	1240	5	37	—
		0.10 ~ 0.80	566 ± 8	1035	1170	3	35	—
		0.80 ~ <1.50		1035	1170	4	35	—
		1.50 ~ 8.0		1035	1170	5	35	—

11. 弹簧用不锈钢冷轧钢带力学性能 (表 15-11)

表 15-11 弹簧用不锈钢冷轧钢带力学性能 (YB/T 5310—2006)

牌号	交货 状态	冷轧或固溶状态			沉淀硬化处理状态		
		屈服强度 /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长 率(%)	热处理	屈服强度 /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 /(N/mm <sup>2</sup> )
1Cr17Ni7	DY	≥510	≥930	≥10	—	—	—
	BY	≥745	≥1130	≥5	—	—	—
	Y	≥1030	≥1320	—	—	—	—
	TY	≥1275	≥1570	—	—	—	—
0Cr19Ni9	DY	≥470	≥780	≥6	—	—	—
	BY	≥665	≥930	≥3	—	—	—
	Y	≥880	≥1130	—	—	—	—
0Cr17Ni7Al	固溶	—	≤1030	≥20	固溶 + 565℃时效 固溶 + 510℃时效	≥960 ≥1030	≥1140 ≥1230
	DY	—	≥1080	≥5	DY + 475℃时效	≥880	≥1230
	BY	—	≥1180	—	BY + 475℃时效	≥1080	≥1420
	Y	—	≥1420	—	Y + 475℃时效	≥1320	≥1720
	—	—	—	—	—	—	—



12. 彩色显像管弹簧用不锈钢冷轧钢带力学性能（表 15-12）

表 15-12 彩色显像管弹簧用不锈钢冷轧钢带力学性能（YB/T 110—1997）

合金牌号	硬度 HV	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)	刚性试验, 角度/(°)	弹回试验,角度/(°)	
					厚度 > 0.65mm	厚度 ≤ 0.65mm
0Cr19Ni9	≥370	1130 ~ 1370	≥3	<45	>14	>17
1Cr18Ni9	≥380	1270 ~ 1470	≤4.5( $A_{50mm}$ )	—	—	—
1Cr17Ni7	375 ~ 430	1130 ~ 1420	≥10	—	—	—

注：1. 厚度 >1.0mm 和 <0.13mm 的钢带，不作刚性、弹回试验。  
2. 牌号 1Cr18Ni9 的断后伸长率采用原始标距为 50mm 的定标距试样。

13. 磁头用不锈钢冷轧钢带的力学性能（表 15-13）

表 15-13 磁头用不锈钢冷轧钢带的力学性能（YB/T 085—2007）

交 货 状 态	硬度 HV	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{50mm}$ (%)
冷硬	340 ~ 400	—	—
半冷硬	250 ~ 310	730 ~ 950	≥15
软	130 ~ 180	—	—

15.1.2 不锈钢钢管的力学性能

1. 不锈钢极薄壁无缝钢管的力学性能（表 15-14）

表 15-14 不锈钢极薄壁无缝钢管的力学性能（GB/T 3089—2008）

统一数字 牌号	新 牌 号	旧 牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
			≥	
S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	520	35
S30403	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	440	40
S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	480	40
S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	540	35
S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	520	40

2. 机械结构用不锈钢焊接钢管的力学性能（表 15-15）

表 15-15 机械结构用不锈钢焊接钢管的力学性能 (GB/T 12770—2002)

序号	牌 号	规定非比例 延伸强度	抗拉强度	断后伸长率 A(%)	
		$R_{p0.2}/(N/mm^2)$	$R_m/(N/mm^2)$	热处理状态	非热处理状态
		$\geq$			
1	1Cr18Ni9	210	520	35	25
2	0Cr18Ni9	210	520		
3	00Cr19Ni10	180	480		
4	0Cr25Ni20	210	520		
5	0Cr17Ni12Mo2	210	520		
6	00Cr17Ni14Mo2	180	480		
7	0Cr18Ni10Ti	210	520		
8	1Cr18Ni9Ti	210	520		
9	0Cr18Ni11Nb	210	520		
10	1Cr17	210	410	20	—
11	1Cr15	210	410	20	—
12	0Cr13	210	410		
13	1Cr13	210	410		
14	00Cr12Ti	175 ~ 270	365 ~ 460	35	

3. 建筑装饰用不锈钢焊接管材的力学性能 (表 15-16)

表 15-16 建筑装饰用不锈钢焊接管材的力学性能 (JG/T 3030—1995)

牌 号		焊后经热处理			焊 接 态		
		抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后 伸长率 A(%) ≥	抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后 伸长率 A(%) ≥
奥氏 体型	00Cr19Ni10	480	180	35	480	180	25
	00Cr17Ni14Mo						
	0Cr18Ni9	520	210		520	210	
	1Cr18Ni9						
	1Cr18Ni9Ti						
	0Cr17Ni12Mo2						
铁素 体型	1Cr17	410	210	20	按双方协议		

## 4. 结构用不锈钢无缝钢管的力学性能 (表 15-17)

表 15-17 结构用不锈钢无缝钢管的力学性能 (GB/T 14975—2002)

组织 类型	序 号	牌 号	推荐热处理制度	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A(\%)$	密度 /(kg/dm <sup>3</sup> )
				≥			
奥氏 体	1	0Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.93
	2	1Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.90
	3	00Cr19Ni10	1010 ~ 1150℃, 急冷	480	175	35	7.93
	4	0Cr18Ni10Ti	920 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.95
	5	0Cr18Ni11Nb	980 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	6	0Cr17Ni12Mo2	1010 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	7	00Cr17Ni14Mo2	1010 ~ 1150℃, 急冷	480	175	35	7.98
	8	0Cr18Ni12Mo2Ti	1000 ~ 1100℃, 急冷	530	205	35	8.00
	9	1Cr18Ni12Mo2Ti	1000 ~ 1100℃, 急冷	530	205	35	8.00
	10	0Cr18Ni12Mo3Ti	1000 ~ 1100℃, 急冷	530	205	35	8.10
	11	1Cr18Ni12Mo3Ti	1000 ~ 1100℃, 急冷	530	205	35	8.10
	12	1Cr18Ni9Ti	1000 ~ 1100℃, 急冷	520	205	35	7.90
	13	0Cr19Ni13Mo3	1010 ~ 1150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	14	00Cr19Ni13Mo3	1010 ~ 1150℃, 急冷	480	175	35	7.98
	15	00Cr18Ni10N	1010 ~ 1150℃, 急冷	550	245	40	7.90
	16	0Cr19Ni9N	1010 ~ 1150℃, 急冷	550	275	35	7.90
	17	00Cr17Ni13Mo2N	1010 ~ 1150℃, 急冷	550	245	40	8.00
	18	0Cr17Ni12Mo2N	1010 ~ 1150℃, 急冷	550	275	35	7.80
铁素 体型	19	1Cr17	780 ~ 850℃, 空冷或缓冷	410	245	20	7.70
马氏 体型	20	0Cr13	800 ~ 900℃, 缓冷或 750℃ 快冷	370	180	22	7.70
	21	1Cr13	800 ~ 900℃, 缓冷	410	205	20	7.70
	22	2Cr13	800 ~ 900℃, 缓冷	470	215	19	7.70
奥氏体- 铁素体 双相型	23	00Cr18Ni5Mo3Si2	920 ~ 1150℃, 急冷	590	390	20	7.98

注: 热挤压管的抗拉强度允许降低 20N/mm<sup>2</sup>。

5. 流体输送用不锈钢焊接钢管力学性能（表 15-18）

表 15-18 流体输送用不锈钢焊接钢管力学性能（GB/T 12771—2008）

序号	新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	
					热处理 状态	非热处理 状态
					$\geq$	
1	12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	210	520	35	25
2	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	210	520		
3	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	180	480		
4	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	210	520		
5	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	210	520		
6	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	180	480		
7	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	210	520		
8	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	210	520		
9	022Cr18Ti	00Cr17	180	360	20	—
10	019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	240	410		
11	06Cr13Al	0Cr13Al	177	410		
12	022Cr11Ti	—	275	400	18	—
13	022Cr12Ni	—	275	400	18	—
14	06Cr13	0Cr13	210	410	20	—

6. 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管的热处理制度及力学性能（表 15-19）

表 15-19 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管的热处理制度及力学性能  
(GB/T 21833—2008)

序号	牌 号	热处理制度	拉 伸 性 能			硬 度	
			抗拉强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	HBW	HRC
			$\geq$			$\leq$	
1	022Cr19Ni5Mo8Si2	980 ~ 1040℃, 急冷	630	440	30	290	30
2	022Cr22Ni5Mo3N	1020 ~ 1100℃, 急冷	620	450	25	290	30
3	022Cr23Ni4MoCuN	925 ~ 1050℃, 急冷(直径 $\leq 25$ mm)	690	450	25		

(续)

序号	牌 号	热处理制度	拉 伸 性 能			硬 度	
			抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	HBW	HRC
			≥			≤	
3	022Cr23Ni4MoCuN	925 ~ 1050℃ , 急冷 (直径 > 25mm)	600	420	25	290	30
4	022Cr23Ni5Mo3N	1020 ~ 1100℃ , 急冷	655	485	25	290	30
5	022Cr24Ni7Mo4CuN	1080 ~ 1120℃ , 急冷	770	550	25	310	
6	022Cr25Ni6Mo2N	1050 ~ 1100℃ , 急冷	690	450	25	280	
7	022Cr25Ni7Mo3WCuN	1020 ~ 1100℃ , 急冷	690	450	25	290	30
8	022Cr25Ni6Mo4N	1025 ~ 1125℃ , 急冷	800	550	15	300	32
9	03Cr25Ni6Mo3Cu2N	≥1040℃ , 急冷	760	550	15	297	31
10	022Cr25Ni7Mo4WCuN	1100 ~ 1140℃ , 急冷	750	550	25	300	
11	06Cr26Ni4Mo2	925 ~ 955℃ , 急冷	620	485	20	271	28
12	12Cr21Ni5Ti	950 ~ 1100℃ , 急冷	590	345	20		

7. 奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管的热处理制度及力学性能 (表 15-20)

表 15-20 奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管的热处理制度及力学性能  
(GB/T 21832—2008)

序号	牌 号	推荐热处理制度	拉 伸 性 能			硬 度	
			抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	HBW	HRC
			≥			≤	
1	022Cr19Ni5Mo3Si2N	980 ~ 1040℃ , 急冷	630	440	30	290	30
2	022Cr22Ni5Mo3N	1020 ~ 1100℃ , 急冷	620	450	25	290	30
3	022Cr23Ni6Mo3N	1020 ~ 1100℃ , 急冷	655	485	25	290	30
4	022Cr23Ni4MoCuN	925 ~ 1050℃ , 急冷 (直径 ≤ 25mm)	690	450	25	—	—
		925 ~ 1050℃ , 急冷 (直径 > 25mm)	600	400	25	290	30

(续)

序号	牌 号	推荐热处理制度	拉 伸 性 能			硬 度	
			抗拉强度 $R_m /$ ( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2} /$ ( $N/mm^2$ )	断后伸 长率 $A(\%)$	HBW	HRC
			$\geq$			$\leq$	
5	022Cr25Ni6Mo2N	1050 ~ 1100℃, 急冷	690	450	25	280	—
6	022Cr25Ni7Mo3WCuN	1020 ~ 1100℃, 急冷	690	450	25	290	30
7	03Cr25Ni6Mo3Cu2N	$\geq 1040^\circ C$ , 急冷	760	550	15	297	31
8	022Cr25Ni7Mo4N	1025 ~ 1125℃, 急冷	800	550	15	300	32
9	022Cr25Ni7Mo4WCuN	1100 ~ 1140℃, 急冷	750	550	25	300	—

8. 装饰用焊接不锈钢管的力学性能 (表 15-21)

表 15-21 装饰用焊接不锈钢管的力学性能 (YB/T 5363—2006)

牌 号	推荐热处理制度	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2} / (N/mm^2) \geq$	抗拉强度 $R_m / (N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	硬度 HBW $\leq$
0Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃, 急冷	205	520	35	187
1Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃, 急冷	205	520	35	187

9. 锅炉和热交换器用不锈钢无缝钢管的力学性能 (表 15-22)

表 15-22 锅炉和热交换器用不锈钢无缝钢管的力学性能 (GB 13296—2007)

组织类型	序号	牌 号	推荐热处理制度		抗拉强度 $R_m /$ ( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2} /$ ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A$ (%)	密度 $\rho /$ ( $g/cm^3$ )
					$\geq$			
奥氏体型	1	0Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃	急冷	520	205	35	7.93
	2	1Cr18Ni9	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.90
	3	1Cr19Ni9	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.93
	4	00Cr19Ni10	1010 ~ 1150℃		480	175	35	7.93
	5	0Cr18Ni10Ti	920 ~ 1150℃		520	205	35	7.95
	6	1Cr18Ni11Ti	冷轧 $\geq 1095^\circ C$ 热轧 $\geq 1050^\circ C$		520	205	35	7.93
	7	0Cr18Ni11Nb	980 ~ 1150℃		520	205	35	7.98

(续)

组织类型	序号	牌 号	推荐热处理制度		抗拉强度	规定非比例延伸强度	断后伸长率	密度
					$R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	
					≥			
奥氏体型	8	1Cr19Ni11Nb	冷轧≥1095℃ 热轧≥1050℃	急冷	520	205	35	8.00
	9	0Cr17Ni12Mo2	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	10	1Cr17Ni12Mo2	≥1040℃		520	205	35	7.98
	11	00Cr17Ni14Mo2	1010 ~ 1150℃		480	175	40	7.98
	12	0Cr18Ni12Mo2Ti	1000 ~ 1100℃		530	205	35	8.00
	13	1Cr18Ni12Mo2Ti	1000 ~ 1100℃		540	215	35	8.00
	14	0Cr18Ni12Mo3Ti	1000 ~ 1100℃		530	205	35	8.10
	15	1Cr18Ni12Mo3Ti	1000 ~ 1100℃		540	215	35	8.10
	16	1Cr18Ni9Ti	920 ~ 1150℃		520	205	40	7.90
	17	0Cr19Ni13Mo3	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	18	00Cr19Ni13Mo3	1010 ~ 1150℃		480	175	35	7.98
	19	00Cr18Ni10N	1010 ~ 1150℃		515	205	35	7.90
	20	0Cr19Ni9N	1010 ~ 1150℃		550	240	35	7.90
	21	0Cr23Ni13	1030 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	22	2Cr23Ni13	1030 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	23	0Cr25Ni20	1030 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	24	2Cr25Ni20	1030 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	25	0Cr18Ni13Si4	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	26	00Cr17Ni13Mo2N	1010 ~ 1150℃		515	205	35	8.00
	27	0Cr17Ni2Mo2N	1010 ~ 1150℃		550	240	35	7.80
	28	0Cr18Ni13Mo2Cu2	1010 ~ 1150℃		520	205	35	7.98
	29	00Cr18Ni11Mo2Cu2	1010 ~ 1150℃		480	180	35	7.98
铁素体型	30	1Cr17	780 ~ 850℃	空冷	410	245	20	7.70
	31	00Cr27Mo	900 ~ 1050℃	急冷	410	245	20	7.70



## 15.1.3 不锈钢钢丝的力学性能

## 1. 软态不锈钢丝的力学性能 (表 15-23)

表 15-23 软态不锈钢丝的力学性能 (GB/T 4240—2009)

牌 号	公称直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
12Cr17Mn6Ni5N 12Cr18Mn9Ni5N 12Cr18Ni9 Y12Cr18Ni9 16Cr23Ni13 20Cr25Ni20Si2	0.05 ~ 0.10	700 ~ 1000	15
	>0.10 ~ 0.30	660 ~ 950	20
	>0.30 ~ 0.60	640 ~ 920	20
	>0.60 ~ 1.0	620 ~ 900	25
	>1.0 ~ 3.0	620 ~ 880	30
	>3.0 ~ 6.0	600 ~ 850	30
	>6.0 ~ 10.0	580 ~ 830	30
	>10.0 ~ 16.0	550 ~ 800	30
Y06Cr17Mn6Ni6Cu2 Y12Cr18Ni9Cu3 06Cr19Ni9 022Cr19Ni10 10Cr18Ni12 06Cr17Ni12Mo2 06Cr20Ni11 06Cr23Ni13 06Cr25Ni20 06Cr17Ni12Mo2 022Cr17Ni14Mo2 06Cr19Ni13Mo3 06Cr17Ni12Mo2Ti	0.05 ~ 0.10	650 ~ 930	15
	>0.10 ~ 0.30	620 ~ 900	20
	>0.30 ~ 0.60	600 ~ 870	20
	>0.60 ~ 1.0	580 ~ 850	25
	>1.0 ~ 3.0	570 ~ 830	30
	>3.0 ~ 6.0	550 ~ 800	30
	>6.0 ~ 10.0	520 ~ 770	30
	>10.0 ~ 16.0	500 ~ 750	30
	1.0 ~ 2.0	600 ~ 850	10
	>2.0 ~ 16.0	600 ~ 850	15

注：易切削钢丝和公称直径小于 1.0mm 的钢丝，断后伸长率供参考，不作判定依据。

2. 轻拉不锈钢丝的力学性能（表 15-24）

表 15-24 轻拉不锈钢丝的力学性能（GB/T 4240—2009）

牌 号	公称尺寸 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	牌 号	公称尺寸 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )
12Cr17Mn6Ni5N 12Cr18Mn9Ni5N Y06Cr17Mn6Ni6Cu2 12Cr18Ni9 Y12Cr18Ni9 Y12Cr18Ni9Cu3 06Cr19Ni9 022Cr19Ni10 10Cr18Ni12 06Cr20Ni11	0.50 ~ 1.0  > 1.0 ~ 3.0  > 3.0 ~ 6.0  > 6.0 ~ 10.0  > 10.0 ~ 16.0	850 ~ 1200  830 ~ 1150  800 ~ 1100  770 ~ 1050  750 ~ 1030	06Cr13Al 06Cr11Ti 022Cr11Nb 10Cr17 Y10Cr17 10Cr17Mo 10Cr17MoNb  12Cr13 Y12Cr13 20Cr13  30Cr13 32Cr13Mo Y30Cr13 Y16Cr17Ni2Mo	0.30 ~ 3.0  > 3.0 ~ 6.0  > 6.0 ~ 16.0  1.0 ~ 3.0 > 3.0 ~ 6.0 > 6.0 ~ 16.0  1.0 ~ 3.0 > 3.0 ~ 6.0 > 6.0 ~ 16.0	530 ~ 780  500 ~ 750  480 ~ 730  600 ~ 850 580 ~ 820 550 ~ 800  650 ~ 950 600 ~ 900 600 ~ 850
16Cr23Ni13 06Cr23Ni13 06Cr25Ni20 20Cr25Ni20Si2 06Cr17Ni12Mo2 022Cr17Ni14Mo2 06Cr19Ni13Mo3 06Cr17Ni12Mo2Ti	0.50 ~ 1.0  > 1.0 ~ 3.0  > 3.0 ~ 6.0  > 6.0 ~ 10.0  > 10.0 ~ 16.0	850 ~ 1200  830 ~ 1150  800 ~ 1100  770 ~ 1050  750 ~ 1030			

3. 冷拉不锈钢丝的力学性能（表 15-25）

表 15-25 冷拉不锈钢丝的力学性能（GB/T 4240—2009）

牌 号	公称尺寸/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )
12Cr17Mn6Ni5N 12Cr18Mn9Ni5N 12Cr18Ni9 06Cr19Ni9 10Cr18Ni12 06Cr17Ni12Mo2	0.10 ~ 1.0  > 1.0 ~ 3.0  > 3.0 ~ 6.0  > 6.0 ~ 12.0	1200 ~ 1500  1150 ~ 1450  1100 ~ 1400  950 ~ 1250

4. 弹簧用不锈钢丝的抗拉强度（表 15-26）

表 15-26 弹簧用不锈钢丝的抗拉强度 (YB/T 11—1983)

钢丝直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		
	A 组 1Cr18Ni9 0Cr19Ni10 0Cr17Ni12Mo2	B 组 1Cr18Ni9 0Cr19Ni10	C 组 0Cr17Ni8Al
0.080	1618 ~ 1863	2157 ~ 2403	—
0.090			
0.10			1961 ~ 2206
0.12			
0.14			
0.16			
0.18			
0.20			
0.23	1569 ~ 1814	2059 ~ 2305	1912 ~ 2157
0.26			
0.29			
0.32			
0.35		1961 ~ 2206	1814 ~ 2059
0.40			
0.45			
0.50			
0.55			
0.60			
0.65			
0.70			
0.80	1471 ~ 1716	1863 ~ 2108	1765 ~ 2010
0.90			
1.00			
1.20	1373 ~ 1618	1765 ~ 2010	1667 ~ 1912
1.40			
1.60	1324 ~ 1569	1667 ~ 1912	1569 ~ 1814
1.80			
2.00			

(续)

钢丝直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		
	A 组 1Cr18Ni9 0Cr19Ni10 0Cr17Ni12Mo2	B 组 1Cr18Ni9 0Cr19Ni10	C 组 0Cr17Ni8Al
2.30	1275 ~ 1520	1590 ~ 1814	1471 ~ 1716
2.60			
2.80	1177 ~ 1422	1471 ~ 1716	1373 ~ 1618
3.20			
3.50			
4.00			
4.50	1079 ~ 1324	1373 ~ 1618	1275 ~ 1520
5.00			
5.50			
6.00			

5. 外科植入物用不锈钢丝的力学性能 (表 15-27)

表 15-27 外科植入物用不锈钢丝的力学性能 (GB 4234—2003)

交货状态	牌 号	公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
固溶	00Cr18Ni14Mo3 00Cr18Ni15Mo3N	0.025 ~ 0.13	$\leq 1000$	$\geq 30$
		> 0.13 ~ 0.23	$\leq 930$	$\geq 30$
		> 0.23 ~ 0.38	$\leq 890$	$\geq 35$
		> 0.38 ~ 0.50	$\leq 860$	$\geq 40$
		> 0.50 ~ 0.65	$\leq 820$	$\geq 40$
		> 0.65	$\leq 800$	$\geq 40$
冷拉	00Cr18Ni14Mo3 00Cr18Ni15Mo3N	0.20 ~ 0.7	1600 ~ 1850	—
		> 0.70 ~ 1.00	1500 ~ 1750	—
		> 1.00 ~ 1.50	1400 ~ 1650	—
		> 1.50 ~ 2.00	1350 ~ 1600	—

15.1.4 不锈钢钢棒的力学性能

1. 经固溶处理的奥氏体型不锈钢钢棒的力学性能 (表 15-28)

表 15-28 经固溶处理的奥氏体型不锈钢钢棒的力学性能 (GB/T 1220—2007)

GB/T 20878 中序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	硬 度		
								HBW	HRB	HV
								≧		
24	S30478	06Cr19Ni9NbN	0Cr19Ni10NbN	345	685	35	50	250	100	260
25	S30453	022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	245	550	40	50	217	95	220
26	S30510	10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	175	480	40	60	187	90	200
32	S30908	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	205	520	40	60	187	90	200
35	S31008	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	205	520	40	50	187	90	200
38	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	205	520	40	60	187	90	200
39	S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	175	480	40	60	187	90	200
41	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	205	530	40	55	187	90	200
43	S31658	06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	275	550	35	50	217	95	220
44	S31653	022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	245	550	40	50	217	95	220
45	S31688	06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	205	520	40	60	187	90	200
46	S31683	022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2	175	480	40	60	187	90	200
49	S31708	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	205	520	40	60	187	90	200
50	S31703	022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	175	480	40	60	187	90	200
52	S31794	03Cr18Ni16Mo5	0Cr18Ni16Mo5	175	480	40	45	187	90	200
55	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	205	520	40	50	187	90	200
62	S34778	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	205	520	40	50	187	90	200
64	S38148	06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	205	520	40	60	207	95	218

2. 经固溶处理的奥氏体-铁素体型钢棒的力学性能(表 15-29)

表 15-29 经固溶处理的奥氏体-铁素体型钢棒的力学性能(GB/T 1220—2007)

GB/T 20878 中序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	冲击吸收功 $A_{KU2}$ /J	硬 度		
									HBW	HRB	HV
				$\geq$				$\leq$			
67	S21860	14Cr18Ni11S4AlTi	1Cr18Ni11S4AlTi	440	715	25	40	63	—	—	—
68	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	390	590	20	40	—	290	30	300
70	S22253	022Cr22Ni5Mo3N	—	450	620	25	—	—	290	—	—
71	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	—	450	655	25	—	—	290	—	—
73	S22553	022Cr25Ni6Mo2N	—	450	620	20	—	—	260	—	—
75	S25554	03Cr25Ni6Mo3Cu2N	—	550	750	25	—	—	290	—	—

3. 经退火处理的铁素体型钢棒的力学性能(表 15-30)

表 15-30 经退火处理的铁素体型钢棒的力学性能(GB/T 1220—2007)

GB/T 20878 中序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	冲击吸收功 $A_{KU2}$ /J	硬度 HBW
78	S11348	06Cr13Al	0Cr13Al	175	410	20	60	78	183
83	S11203	022Cr12	00Cr12	195	360	22	60	—	183
85	S11710	10Cr17	1Cr17	205	450	22	50	—	183
86	S11717	Y10Cr17	Y1Cr17	205	450	22	50	—	183
88	S11790	10Cr17Mo	1Cr17Mo	205	450	22	60	—	183
94	S12791	008Cr27Mo	00Cr27Mo	245	410	20	45	—	219
95	S13091	008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	295	450	20	45	—	228

4. 经热处理的马氏体型钢棒的力学性能(表 15-31)

表 15-31 经热处理的马氏体型钢棒的力学性能(GB/T 1220—2007)

GB/T 20878 中序号	统一数字代号	新牌号	旧牌号	经淬火回火后试样的力学性能和硬度							退火后 钢棒的 硬度 HBW
				规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A (%)	断面收 缩率 Z (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}$ /J	HBW	HRC	
96	S40310	12Cr12	1Cr12	390	590	25	55	118	170	—	200
97	S41008	06Cr13	0Cr13	345	490	24	60	—	—	—	183
98	S41010	12Cr13	1Cr13	345	540	22	55	78	159	—	200
100	S41617	Y12Cr13	Y1Cr13	345	540	17	45	55	159	—	200
101	S42020	20Cr13	2Cr13	440	640	20	50	63	192	—	223
102	S42030	30Cr13	3Cr13	540	735	12	—	24	217	—	235
103	S42037	Y30Cr13	Y3Cr13	540	735	8	35	24	217	—	235
104	S42040	40Cr13	4Cr13	—	—	—	—	—	—	50	235
106	S43110	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	—	1080	10	—	39	—	—	285
107	S43120	17Cr16Ni2	—	700 600	900 ~ 1050 800 ~ 950	12 14	45	25	—	—	295
108	S44070	68Cr17	7Cr17	—	—	—	—	—	—	54	255
109	S44080	85Cr17	8Cr17	—	—	—	—	—	—	56	255
110	S44096	108Cr17	11Cr17	—	—	—	—	—	—	58	269
111	S44097	Y108Cr17	Y11Cr17	—	—	—	—	—	—	58	269
112	S44090	95Cr18	9Cr18	—	—	—	—	—	—	55	255
115	S45710	13Cr13Mo	1Cr13Mo	490	690	20	60	78	192	—	200
116	S45830	32Cr13Mo	3Cr13Mo	—	—	—	—	—	—	50	207
117	S45990	102Cr17Mo	9Cr18Mo	—	—	—	—	—	—	55	269
118	S46990	90Cr18MoV	9Cr18MoV	—	—	—	—	—	—	55	269



5. 沉淀硬化型钢棒的力学性能(表 15-32)

表 15-32 沉淀硬化型钢棒的力学性能(GB/T 1220—2007)

GB/T 20878 中序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	热 处 理	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	硬 度		
									HBW	HRC	
											≥
136	S51550	05Cr15Ni5Cu4Nb		固溶处理	—	—	—	—	≤363	≤38	
					沉淀硬化	480℃时效	1180	1310	10	35	≥375
				550℃时效		1000	1070	12	45	≥331	≥35
				580℃时效		865	1000	13	45	≥302	≥31
				620℃时效	725	930	16	50	≥277	≥28	
137	S51740	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶处理	—	—	—	—	≤363	≤38	
					沉淀硬化	480℃时效	1180	1310	10	40	≥375
				550℃时效		1000	1070	12	45	≥331	≥35
				580℃时效		865	1000	13	45	≥302	≥31
				620℃时效	725	930	16	50	≥277	≥28	
138	S51770	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	固溶处理	≤380	≤1030	20	—	≤229	—	
					沉淀硬化	510℃时效	1030	1230	4	10	≥388
				565℃时效		960	1140	5	25	≥363	—
				固溶处理		—	—	—	—	≤269	—
					沉淀硬化	510℃时效	1210	1320	6	20	≥388
565℃时效	1100	1210	7	25		≥375	—				
139	S51570	07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	固溶处理	—	—	—	—	≤269	—	
					沉淀硬化	510℃时效	1210	1320	6	20	≥388
				565℃时效		1100	1210	7	25	≥375	—

6. 外科植入物用不锈钢棒的力学性能（表 15-33）

表 15-33 外科植入物用不锈钢棒的力学性能（GB 4234—2003）

交货状态	牌 号	公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
固溶	00Cr18Ni14Mo3	全部	490 ~ 690	$\geq 190$	$\geq 40$
	00Cr18Ni15Mo3N		590 ~ 800	$\geq 285$	$\geq 40$
冷拉	00Cr18Ni14Mo3 00Cr18Ni15Mo3N	< 19	860 ~ 1100	$\geq 690$	$\geq 12$

15.1.5 特种不锈钢的力学性能

1. 不锈钢焊条的力学性能（表 15-34）

表 15-34 不锈钢焊条的力学性能（GB/T 983—1995）

焊 条 型 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	焊 条 型 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
E209-XX	690	15	E312-XX	660	22
E219-XX	620		E316-XX	520	30
E240-XX	690		E316H-XX		
E307-XX	590	30	E316L-XX	490	
E308-XX	550	35	E317-XX	550	25
E308H-XX			E317L-XX	520	
E308L-XX	520		E317MoCu-XX	540	
E308Mo-XX	550		E317MoCuL-XX		
E308MoL-XX	520		E318-XX	550	
E309-XX	550	25	E318V-XX	540	30
E309L-XX	520		E320-XX	550	
E309Nb-XX	550		E320LR-XX	520	
E309Mo-XX			E330-XX		10
E309MoL-XX	540		E330H-XX	620	25
E310-XX	550		E330MoMnWNb-XX	590	
E310H-XX	620	10	E347-XX	520	25
W310Nb-XX	550	25	E349-XX	690	25
E310Mo-XX			E383-XX	520	30

(续)

焊条型号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	焊条型号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)
E385-XX	520	30	E16-25MoN-XX	610	30
E410-XX <sup>①</sup>	450	20	E7Cr-XX <sup>④</sup>	420	20
E410NiMo-XX <sup>②</sup>	760	15	E5MoV-XX <sup>⑥</sup>	540	14
E430-XX <sup>③</sup>	450	20	E9Mo-XX <sup>⑦</sup>	590	16
E502-XX <sup>④</sup>	420		E11MoVN <sub>i</sub> -XX <sup>⑦</sup>	730	15
E505-XX <sup>④</sup>			E11MoVN <sub>i</sub> W-XX <sup>⑦</sup>		
E630-XX <sup>⑤</sup>	930	7	E2209-XX	690	20
E16-8-2-XX	550	35	E2553-XX	760	15

注：表中的数值均为最小值。

- ① 试件在 730 ~ 760℃ 保温 1h，以不超过 60℃/h 的速度随炉冷至 315℃，然后空冷。
- ② 试件在 595 ~ 620℃ 保温 1h，然后空冷。
- ③ 试件在 760 ~ 790℃ 保温 2h，以不超过 55℃/h 的速度随炉冷至 595℃，然后空冷。
- ④ 试件在 840 ~ 870℃ 保温 2h，以不超过 55℃/h 的速度随炉冷至 595℃，然后空冷。
- ⑤ 试件在 1025 ~ 1050℃ 保温 1h 后空冷至室温，随后再加热至 610 ~ 630℃ 保温 4h，进行沉淀硬化处理，然后空冷到室温。
- ⑥ 试件在 740 ~ 760℃ 保温 4h，然后空冷。
- ⑦ 试件在 730 ~ 750℃ 保温 4h，然后空冷。

2. 外科植入物用不锈钢板及钢带的力学性能（表 15-35）

表 15-35 外科植入物用不锈钢板及钢带的力学性能（GB 4234—2003）

交货状态	牌 号	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
固溶	00Cr18Ni14Mo3	490 ~ 690	≥190	≥40
	00Cr18Ni15Mo3N	600 ~ 800	≥300	≥40
轻度冷轧	00Cr18Ni14Mo3	≥610	≥300	≥35
	00Cr18Ni15Mo3N	≥650	≥390	≥35
冷轧	00Cr18Ni14Mo3 00Cr18Ni15Mo3N	860 ~ 1100	≥600	≥12

3. 含铜抗菌不锈钢的力学性能（表 15-36）

表 15-36 含铜抗菌不锈钢的力学性能 (YB/T 4171—2008)

类型	牌 号	推荐的热 处理制度	力 学 性 能			硬 度		
			规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸 长率 $A(\%)$	HBW	HRB	HV
			$\geq$			$\leq$		
奥氏体	06Cr18Ni9Cu2	固 溶 1010 ~ 1150℃, 快冷	205	520	35	187	90	200
	06Cr18Ni9Cu3							
铁素体	06Cr17Cu2	780 ~ 850℃, 空冷或缓冷	205	450	22	183	88	200
	022Cr12Cu2		170	360	22	183	88	200
马氏体	20Cr13Cu3	800 ~ 900℃, 缓冷	225	530	18	223	97	234
	30Cr13Cu3		255	540	18	235	99	247

15.2 耐热钢的力学性能

15.2.1 耐热钢板和钢带的力学性能

1. 经固溶处理的奥氏体型耐热钢钢板和钢带的力学性能 (表 15-37)

表 15-37 经固溶处理的奥氏体型耐热钢钢板和钢带的力学性能 (GB/T 4238—2007)

GB/T 20878 中序号	新 牌 号	旧 牌 号	拉 伸 试 验			硬 度 试 验		
			规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后 伸长率 $A(\%)$	HBW	HRB	HV
			$\geq$			$\leq$		
13	12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	205	515	40	201	92	210
14	12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9Si3	205	515	40	217	95	220
17	06Cr19Ni9	0Cr18Ni9	205	515	40	201	92	210
19	07Cr19Ni10	—	205	515	40	201	92	210
29	06Cr20Ni11	—	205	515	40	183	88	—
31	16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	205	515	40	217	95	220
32	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	205	515	40	217	95	220
34	20Cr25Ni20	2Cr25Ni20	205	515	40	217	95	220
35	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	205	515	40	217	95	220
38	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	205	515	40	217	95	220
49	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	205	515	35	217	95	220
55	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	205	515	40	217	95	220
60	12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	205	560	—	201	95	210
62	06Cr18NiNb	0Cr18Ni11Nb	205	515	40	201	92	210
66	16Cr25Ni20Si2	1Cr25Ni20Si2	—	540	35	—	—	—

2. 经退火处理的铁素体型耐热钢板和钢带的力学性能(表 15-38)

表 15-38 经退火处理的铁素体型耐热钢板和钢带的力学性能(GB/T 4238—2007)

GB/T 20878 中序号	新 牌 号	旧 牌 号	拉 伸 试 验			硬 度 试 验			弯 曲 试 验	
			规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A (%)	HBW	HRB	HV	弯曲 角度	$d$ —弯心直径 $a$ —钢板厚度
			$\geq$			$\leq$				
78	06Cr13Al	0Cr13Al	170	415	20	179	88	200	180°	$d = 2a$
80	022Cr11Ti	—	275	415	20	197	92	200	180°	$d = 2a$
81	022Cr11NbTi	—	275	415	20	197	92	200	180°	$d = 2a$
85	10Cr17	1Cr17	205	450	22	183	89	200	180°	$d = 2a$
93	16Cr25N	2Cr25N	275	510	20	201	95	210	135°	—

3. 经退火处理的马氏体型耐热钢板和钢带的力学性能(表 15-39)

表 15-39 经退火处理的马氏体型耐热钢板和钢带的力学性能(GB/T 4238—2007)

GB/T 20878 中序号	新 牌 号	旧 牌 号	拉 伸 试 验			硬 度 试 验			弯 曲 试 验	
			规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ / ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	抗拉强度 $R_m$ / ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	断后伸 长率 $A$ (%)	HBW	HRB	HV	弯曲 角度	$d$ —弯心直径 $a$ —钢板厚度
			$\geq$				$\leq$			
96	12Cr12	1Cr12	205	485	25	217	88	210	180°	$d=2a$
98	12Cr13	1Cr13	—	690	15	217	96	210	—	—
124	22Cr12NiMoWV	2Cr12NiMoWV	275	510	20	200	95	210	—	$a\geq 3\text{mm}, d=a$

4. 经固溶处理的沉淀硬化型耐热钢板和钢带的力学性能(表 15-40)

表 15-40 经固溶处理的沉淀硬化型耐热钢板和钢带的力学性能(GB/T 4238—2007)

GB/T 20878 中序号	新 牌 号	旧 牌 号	钢材厚度/mm	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长率 $A$ (%)	硬 度	
							HRC	HBW
135	022Cr12Ni9Cu2NbTi	—	0.30 ~ 100	≤1105	≤1205	≥3	≤36	≤331
137	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	0.4 ~ <100	≤1105	≤1255	≥3	≤38	≤363
138	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	0.1 ~ <0.3 0.3 ~ 100	≤450 ≤380	≤1035 ≤1035	— ≥20	— ≤92 <sup>②</sup>	— —
139	07Cr15Ni7Mo2Al	—	0.10 ~ 100	≤450	≤1035	≥25	≤100 <sup>②</sup>	—
142	066Cr17Ni7AlTi	—	0.10 ~ <0.80	≤515	≤825	≥3	≤32	—
			0.80 ~ <1.50	≤515	≤825	≥4	≤32	—
			1.50 ~ 100	≤515	≤825	≥5	≤32	—
143	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB <sup>①</sup>	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	≥2	—	≥725	≥25	≤91 <sup>②</sup>	≤192
			≥2	≥590	≥900	≥15	≤101 <sup>②</sup>	≤248

① 为时效处理后的力学性能。  
② 为 HRB 硬度值。

5. 经沉淀硬化处理的耐热钢板和钢带的力学性能(表 15-41)

表 15-41 经沉淀硬化处理的耐热钢板和钢带的力学性能(GB/T 4238—2007)

GB/T 20878 中序号	牌 号	钢材厚度 /mm	热处理温度 /℃	规定非比例	抗拉强度	断后伸	硬 度	
				延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	长率 $A^{①}$ (%)	HRC	HBW
				≥				
135	022Cr12Ni9Cu2NbTi	0.10 ~ <0.75	510 ± 10 或 480 ± 6	1410	1525	—	≥44	—
		0.75 ~ <1.50		1410	1525	3	≥44	—
		1.50 ~ 16		1410	1525	4	≥44	—

(续)

GB/T 20878 中序号	牌 号	钢材厚度 /mm	热处理温度 /℃	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A^{①}$ (%)	硬 度	
							HRC	HBW
137	05Cr17Ni4Cu4Nb	0.1 ~ <5.0	482 ± 10	1170	1310	5	40 ~ 48	—
		5.0 ~ <16		1170	1310	8	40 ~ 48	388 ~ 477
		16 ~ 100		1170	1310	10	40 ~ 48	388 ~ 477
		0.1 ~ <5.0	496 ± 10	1070	1170	5	38 ~ 46	—
		5.0 ~ <16		1070	1170	8	38 ~ 47	375 ~ 477
		16 ~ 100		1070	1170	10	38 ~ 47	375 ~ 477
		0.1 ~ <5.0	552 ± 10	1000	1070	5	35 ~ 43	—
		5.0 ~ <16		1000	1070	8	33 ~ 42	321 ~ 415
		16 ~ 100		1000	1070	12	33 ~ 42	321 ~ 415
		0.1 ~ <5.0	579 ± 10	860	1000	5	31 ~ 40	—
		5.0 ~ <16		860	1000	9	29 ~ 38	293 ~ 375
		16 ~ 100		860	1000	13	29 ~ 38	293 ~ 375
		0.1 ~ <5.0	593 ± 10	790	965	5	31 ~ 40	—
		5.0 ~ <16		790	965	10	29 ~ 38	293 ~ 375
		16 ~ 100		790	965	14	29 ~ 38	293 ~ 375
		0.1 ~ <5.0	621 ± 10	725	930	8	28 ~ 38	—
		5.0 ~ <16		725	930	10	26 ~ 36	269 ~ 352
		16 ~ 100		725	930	16	26 ~ 36	269 ~ 352
		0.1 ~ <5.0	760 ± 10 621 ± 10	515	790	9	26 ~ 36	255 ~ 331
		5.0 ~ <16		515	790	11	24 ~ 34	248 ~ 321
		16 ~ 100		515	790	18	24 ~ 34	248 ~ 321
138	07Cr17Ni7Al	0.05 ~ <0.30	760 ± 15 加热后冷至 15 ± 3, 再加热到 566 ± 6 后空冷	1035	1240	3	≥ 38	—
		0.30 ~ <5.0		1035	1240	5	≥ 38	—
		5.0 ~ 16		965	1170	7	≥ 38	≥ 352



(续)

GB/T 20878 中序号	牌 号	钢材厚度 /mm	热处理温度 /℃	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A^{①}$ (%)	硬 度	
							HRC	HBW
138	07Cr17Ni7Al	0.05 ~ <0.30	954 ± 8 加热后冷至 -73 ± 6, 再加热到 510 ± 6 后空冷	1310	1450	1	≥44	—
		0.30 ~ <5.0		1310	1450	3	≥44	—
		5.0 ~ 16		1240	1380	6	≥43	≥401
139	07Cr15Ni7Mo2Al	0.05 ~ <0.30	760 ± 15 加热后冷至 15 ± 3, 再加热到 566 ± 6 后空冷	1170	1310	3	≥40	—
		0.30 ~ <5.0		1170	1310	5	≥40	—
		5.0 ~ 16		1170	1310	4	≥40	≥375
		0.05 ~ <0.30	954 ± 8 加热后冷至 -73 ± 6, 再加热到 510 ± 6 后空冷	1380	1550	2	≥46	—
		0.30 ~ <5.0		1380	1550	4	≥46	—
		5.0 ~ 16		1380	1550	4	≥45	≥429
		0.10 ~ <0.80	510 ± 8	1170	1310	3	≥39	—
		0.80 ~ <1.50		1170	1310	4	≥39	—
		1.50 ~ 16		1170	1310	5	≥39	—
142	06Cr17Ni7AlTi	0.10 ~ <0.75	538 ± 8	1105	1240	3	≥37	—
		0.75 ~ <1.50		1105	1240	4	≥37	—
		1.50 ~ 16		1105	1240	5	≥37	—
		0.10 ~ <0.75	566 ± 8	1035	1170	3	≥35	—
		0.75 ~ <1.50		1035	1170	4	≥35	—
		1.50 ~ 16		1035	1170	5	≥35	—
143	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	2.0 ~ <8.0	700 ~ 760	590	900	15	≥101	≥248

注：表中所列为推荐性热处理温度，供方向需方提供推荐性热处理制度。  
① 适用于沿宽度方向的试验，垂直于轧制方向且平行于钢板表面。

15.2.2 耐热钢棒的力学性能

1. 奥氏体型耐热钢棒的力学性能 (表 15-42)

表 15-42 奥氏体型耐热钢棒的力学性能 (GB/T 1221—2007)

GB/T 20878 中序号	统一 数字 代号	新 牌 号	旧 牌 号	热处理状态	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长 率 $A$ (%)	断面收缩 率 $Z$ (%)	硬度 HBW
					$\geq$	$\geq$			$\leq$
6	S35650	53Cr21Mn9Ni4N	5Cr21Mn9Ni4N	固溶 + 时效	560	885	8	—	$\geq 302$
7	S35750	26Cr18Mn12Si2N	3Cr18Mn12Si2N	固溶处理	390	685	35	45	248
8	S35850	22Cr20Mn10Ni2Si2N	2Cr20Mn9Ni2Si2N		390	635	35	45	248
17	S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9		205	520	40	60	187
30	S30850	22Cr21Ni12N	2Cr21Ni12N	固溶 + 时效	430	820	26	20	269
31	S30920	16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	固溶处理	205	560	45	50	201
32	S30908	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13		205	520	40	60	187
34	S31020	20Cr25Ni20	2Cr25Ni20		205	590	40	50	201
35	S31008	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20		205	520	40	50	187
38	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2		205	520	40	60	187
49	S31708	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	退火	205	520	40	60	187
55	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti		205	520	40	50	187
57	S32590	45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo		315	705	20	35	248
60	S33010	12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	固溶处理	205	560	40	50	201
62	S34778	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb		205	520	40	50	187
64	S38148	06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4		205	520	40	60	207
65	S38240	16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2		295	590	35	50	187
66	S38340	16Cr25Ni20Si2	1Cr25Ni20Si2		295	590	35	50	187

注：53Cr21Mn9Ni4N 和 22Cr21Ni12N 仅适用于直径、边长及对边距离或厚度小于或等于 25mm 的钢棒；大于 25mm 的钢棒，可改锻成 25mm 的样坯检验或由供需双方协商确定允许降低其力学性能数值。其余牌号仅适用于直径、边长及对边距离或厚度小于或等于 180mm 的钢棒。大于 180mm 的钢棒，可改锻成 180mm 的样坯检验或由供需双方协商确定，允许降低其力学性能数值。

2. 经退火的铁素体型耐热钢棒的力学性能 (表 15-43)

表 15-43 经退火的铁素体型耐热钢棒的力学性能 (GB/T 1221—2007)

GB/T 20878 中序号	统一 数字 代号	新 牌 号	旧 牌 号	热处理状态	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	断后伸长 率 A (%)	断面收缩 率 Z (%)	硬度 HBW
					$\geq$				$\leq$
78	S11348	06Cr13Al	0Cr13Al	退火	175	410	20	60	183
83	S11203	022Cr12	00Cr12		195	360	22	60	183
85	S11710	10Cr17	1Cr17		205	450	22	50	183
93	S12550	16Cr25N	2Cr25N		275	510	20	40	201

3. 经淬火 + 回火的马氏体型耐热钢棒的力学性能 (表 15-44)

表 15-44 经淬火 + 回火的马氏体型耐热钢棒的力学性能 (GB/T 1221—2007)

GB/T 20878 中序号	统一 数字 代号	新 牌 号	旧 牌 号	热处理 状态	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$	抗拉强度 $R_m$	断后伸 长率 A	断面收 缩率 Z	冲击吸 收功	经淬火 回火后 的硬度	退火后 的硬度
					$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$	(%)	(%)	$A_{KU2}/J$	的硬度 HBW	的硬度 HBW
					$\geq$						
98	S41010	12Cr13	1Cr13	淬火 + 回火	345	540	22	55	78	159	200
101	S42020	20Cr13	2Cr13		440	640	20	50	63	192	223
106	S43110	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2		—	1080	10	—	39	—	—
107	S43120	17Cr16Ni2	—		700	900 ~ 1050	12	45	25	—	295
				600	800 ~ 950	14					

(续)

GB/T 20878 中序号	统一 数字 代号	新 牌 号	旧 牌 号	热处理 状态	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A (%)	断面收 缩率 Z (%)	冲击吸 收功 $A_{KU2}/J$	经淬火 回火后 的硬度 HBW	退火后 的硬度 HBW ≤
113	S45110	12Cr5Mo	1Cr5Mo	淬火 + 回火	390	590	18	—	—	—	200
114	S45610	12Cr12Mo	1Cr12Mo		550	685	18	60	78	217 ~ 248	255
115	S45710	13Cr13Mo	1Cr13Mo		490	690	20	60	78	192	200
119	S46010	14Cr11MoV	1Cr11MoV		490	685	16	55	47	—	200
122	S46250	18Cr12MoVNbN	2Cr12MoVNbN		685	835	15	30	—	≤321	269
123	S47010	15Cr12WMoV	1Cr12WMoV		585	735	15	25	47	—	—
124	S47220	22Cr12NiWMoV	2Cr12NiMoWV		735	885	10	25	—	≤341	269
125	S47310	13Cr11Ni2W2MoV	1Cr11Ni2W2MoV		735	885	15	55	71	269 ~ 321	269
					885	1080	12	50	55	311 ~ 388	
128	S47450	18Cr11NiMoNbVN	(2Cr11NiMoNbVN)		760	930	12	32	20	277 ~ 331	255
130	S48040	42Cr9Si2	4Cr9Si2		590	885	19	50	—	—	269
131	S48045	45Cr9Si3	—		685	930	15	35	—	≥269	—
132	S48140	40Cr10Si2Mo	4Cr10Si2Mo		685	885	10	35	—	—	269
133	S48380	80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni		685	885	10	15	8	≥262	321

4. 沉淀硬化型耐热钢棒的力学性能 (表 15-45)

表 15-45 沉淀硬化型耐热钢棒的力学性能 (GB/T 1221—2007)

GB/T 20878 中序号	统一 数字 代号	新 牌 号	旧 牌 号	热 处 理	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	硬 度		
									HBW	HRC	
137	S51740	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	类型	$\geq$						
				沉淀 硬化	固熔处理	—	—	—	—	$\leq 363$	$\leq 38$
					480℃时效	1180	1310	10	40	$\geq 375$	$\geq 40$
					550℃时效	1000	1070	12	45	$\geq 331$	$\geq 35$
					580℃时效	865	1000	13	45	$\geq 302$	$\geq 31$
138	S51770	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	620℃时效	725	930	16	50	$\geq 277$	$\geq 28$	
				固熔处理	$\leq 380$	$\leq 1030$	20	—	$\leq 229$	—	
				沉淀 硬化	510℃时效	1030	1230	4	$\geq 388$	—	
565℃时效	960	1140	5		25	$\geq 363$	—				
143	S51525	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	固溶 + 时效	590	900	15	18	$\geq 248$	—	

第 16 章 高温合金和耐蚀合金的力学性能

16.1 高温合金的力学性能

16.1.1 高温合金板材的力学性能

1. 高温合金冷轧薄板的瞬时拉伸性能（表 16-1）

表 16-1 高温合金冷轧薄板的瞬时拉伸性能（GB/T 14996—1994）

牌 号		检验试样状态	试验温 度/℃	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
新牌号	原牌号			$\geq$	
GH1035	GH35	交货状态	20	588	35.0
			700	343	35.0
GH1131	GH131	交货状态	20	735	34.0
			900	176	40.0
			1000	108	43.0
GH1140	GH140	交货状态	20	637	40.0
			800	225	40.0
GH2018	GH18	交货状态 + $(800 \pm 10)^\circ\text{C}$ $\times 16\text{h}$ , 空冷	20	931	15.0
			800	431	15.0
GH2132	GH132	交货状态 + $(700 \sim 720)^\circ\text{C}$ $\times (12 \sim 16)\text{h}$ , 空冷	20	882	20.0
			650	735	15.0
			550	784	16.0
GH2302	GH302	交货状态	20	686	30.0
		交货状态 + $(800 \pm 10)^\circ\text{C}$ $\times 16\text{h}$ , 空冷	800	539	6.0
GH3030	GH30	交货状态	20	686	30.0
			700	294	30.0
GH3039	GH39	交货状态	20	735	40.0
			800	245	40.0
GH3044	GH44	交货状态	20	735	40.0
			900	196	30.0
GH3128	GH128	交货状态	20	735	40.0
		交货状态 + $1200^\circ\text{C}$ , 空冷	950	176	40.0

2. 高温合金冷轧薄板的高温持久性能（表 16-2）

表 16-2 高温合金冷轧薄板的高温持久性能（GB/T 14996—1994）

牌 号		检验试样状态	试验温度		持久强度 $\sigma$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断裂时间 /h≥	断后伸长率 A(%)
新牌号	原牌号		/℃				
GH2132	GH132	交货状态 + (700 ~ 720)℃ × 12 ~ 16)h, 空冷	650 550		400 600	100 100	实测 实测
GH2320	GH302	交货状态 + (800 ± 10)℃ × 16h, 空冷	800		220	100	实测
GH3128	GH128	交货状态 + 1200℃, 空冷	规范 I	950	55	板厚 > 1.2mm, 23	实测
						板厚 ≤ 1.2mm, 20	
			规范 II	950	40	100	实测

3. 高温合金热轧板材的力学性能（表 16-3）

表 16-3 高温合金热轧板材的力学性能（GB/T 14995—1994）

牌 号		检验试样状态	试验温度 /℃	瞬时拉伸性能		
新牌号	原牌号			抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
				≥		
GH1035	GH35	交货状态	20	600	35.0	—
			700	350	35.0	—
GH1131	GH131	交货状态	20	750	34.0	—
			900	180	40.0	—
			1000	110	43.0	—
GH1140	GH140	交货状态	20	650	40.0	45.0
			800	250	40.0	50.0
GH2018	GH18	交货状态 + (800 ± 10)℃ × 16h, 空冷	20	950	15.0	—
			800	440	15.0	—
GH2132	GH132	交货状态 + (700 ~ 720)℃ × (12 ~ 16)h, 空冷	20	900	20.0	—
			650	750	15.0	—
			550	800	16.0	—
GH2302	GH302	交货状态	20	700	30.0	—
		交货状态 + (800 ± 10)℃ × 16h, 空冷	800	550	6.0	—



(续)

牌 号		检验试样状态	试验温度 /℃	瞬时拉伸性能		
新牌号	原牌号			抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
				≥		
GH3030	GH30	交货状态	20	700	30.0	—
			700	300	30.0	—
GH3039	GH39	交货状态	20	750	40.0	45.0
			800	250	40.0	50.0
GH3044	GH44	交货状态	20	750	40.0	—
			900	190	30.0	—
GH3128	GH128	交货状态	20	750	40.0	—
		交货状态 + 1200℃, 空冷	950	180	40.0	—

16.1.2 高温合金管材的力学性能

1. 一般用途高温合金管的热处理制度和室温力学性能（表 16-4）

表 16-4 一般用途高温合金管的热处理制度和室温力学性能（GB/T 15062—2008）

牌号	交货状态推荐 热处理制度	室温拉伸性能		
		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
GH1140	1050 ~ 1080℃, 水冷	$\geq 590$	—	$\geq 35$
GH3030	980 ~ 1020℃, 水冷	$\geq 590$	—	$\geq 35$
GH3039	1050 ~ 1080℃, 水冷	$\geq 635$	—	$\geq 35$
GH3044	1120 ~ 1210℃, 空冷	$\geq 685$	—	$\geq 30$
GH3536	1130 ~ 1170℃, $\leq 30mm$ 保温, 快冷	$\geq 690$	$\geq 310$	$\geq 25$

2. 一般用途高温合金管的热处理制度和高温力学性能（表 16-5）

表 16-5 一般用途高温合金管的热处理制度和高温力学性能（GB/T 15062—2008）

牌号	交货状态 + 时效热处理	管材 壁厚 /mm	高温拉伸性能			
			温度 /℃	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
GH4163	交货状态 + 时效: (800℃ ± 10℃) × 8h, 空冷	< 0.5	780	$\geq 540$	—	—
		$\geq 0.5$		$\geq 540$	$\geq 400$	$\geq 9$

16.1.3 高温合金棒材和丝材的力学性能

1. 经时效使用的丝材其热处理制度和室温力学性能（表 16-6）

表 16-6 经时效使用的丝材其热处理制度和室温力学性能（YB/T 5249—1993）

合金牌号		热处理制度	瞬时拉伸性能					硬度 HV	持久性能			
新牌号	原牌号		温度 /℃	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长 率 A (%)	断面 收缩 率 Z (%)		温度 /℃	应力 / (N/mm <sup>2</sup> )	断裂 时间 /h	断后 伸长 率 A (%)
GH2036	GH36	交货状态 + ( 650 ~ 670 )℃ × ( 14 ~ 16 )h, 再升 温至 ( 770 ~ 800 )℃ × ( 10 ~ 12 )h, 空冷	室温	≥850	≥600	≥15	≥20	217 ~ 281	650	350	≥100	—
GH2132	GH132	交货状态 + ( 700 ~ 720 )℃ × 16h, 空冷	室温	≥920	≥600	≥15	≥20	260 ~ 360	650	460	≥23	≥5
				( ≥950 )	—	( ≥ 18 )	( ≥ 40 )	260 ~ 360	650	( 400 )	( 100 )	—

2. 转动部件用高温合金棒材热处理后的室温力学性能（表 16-7）

表 16-7 转动部件用高温合金棒材热处理后的室温力学性能（GB/T 14993—2008）

合金 牌号	试样热处理 制度	拉 伸 性 能					冲击 吸收 功 $A_{KU2}/J$	高温持久性能			室温 硬度 HBW
		试验 温度 /℃	抗拉 强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A (%)	断面收 缩率 Z (%)		试验 温度 t/℃	持久 强度 $\sigma/$ (N/mm <sup>2</sup> )	时间 /h	
			≥							≥	
GH2130	(1180℃ ± 10℃ , 保温 2h,空冷) + (1050℃ ± 10℃ , 保温 4h,空冷) + (800℃ ± 10℃ , 保温 16h,空冷)	800	665	—	3	8	—	850	195	40	269 ~ 341
								800	245	100	

(续)

合金 牌号	试样热处理 制度	拉 伸 性 能						冲击 吸收 功 $A_{KU2}/J$	高温持久性能			室温 硬度 HBW
		试验 温度 /℃	抗拉 强度 $R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	试验 温度 $t/℃$		持久 强度 $\sigma/$ (N/mm <sup>2</sup> )	时间 /h		
											≥	
GH2150A	(1000 ~ 1130℃ , 保温 2 ~ 3h, 油冷) + (780 ~ 830℃ , 保温 5h, 空冷) + (650 ~ 730℃ , 保温 16h, 空冷)	20	1130	685	12	14.0	27	600	785	60	293 ~ 363	
GH4033	(1080℃ ± 10℃ , 保温 8h, 空冷) + (700℃ ± 10℃ , 保温 16h, 空冷)	700	685	—	15	20.0	—	700	430	60	255 ~ 321	
									410	80		
GH4037	(1180℃ ± 10℃ , 保温 2h, 空冷) + (1050℃ ± 10℃ , 保温 4h, 缓冷) + (800℃ ± 10℃ , 保温 16h, 空冷)	800	665	—	5.0	8.0	—	850	196	50	269 ~ 341	
								800	245	100		
GH4049	(1200℃ ± 10℃ , 保温 2h, 空冷) + (1050℃ ± 10℃ , 保温 4h, 空冷) + (850℃ ± 10℃ , 保温 8h, 空冷)	900	570	—	7.0	11.0	—	900	245	40	302 ~ 363	
									215	80		
GH4133B	(1080℃ ± 10℃ , 保温 8h, 空冷) + (750℃ ± 10℃ , 保温 16h, 空冷)	20	1060	735	16	18.0	31	750	392	50	262 ~ 352	
		750	750	实测	12	16.0	—	750	345	50	262 ~ 352	

3. 高温合金冷拉棒材的力学性能 (表 16-8)

表 16-8 高温合金冷拉棒材的力学性能 (GB/T 14994—2008)

牌号	瞬时拉伸性能					室温 冲击 吸收功 $A_{KU2}/J$	布氏 硬度 HBW	高温持久性能			
	试验 温度 /℃	抗拉 强度 $R_m/$ (N/ mm <sup>2</sup> )	规定非 比例延 伸强度 $R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后 伸长 率 $A$ (%)	断面 收缩 率 $Z$ (%)			试验 温度 /℃	持久 强度 $\sigma/$ (N/ mm <sup>2</sup> )	时间 /h	断后 伸长 率 $A$ (%)
		≥									
GH1040	800	295	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GH2063	室温	835	590	15	20	27	811 ~ 276	650	375 (345)	35 (100)	—
GH2132	室温	900	590	15	20	—	341 ~ 247	650	450 (390)	23 (100)	5 (3)
GH2696	室温	1250	1050	10	35	—	302 ~ 229	600	570	实测	—
		1300	1100	10	30	24	229 ~ 143			实测	—
		980	685	10	12	24	341 ~ 285			50	—
		930	635	10	12	—	341 ~ 285			50	—
GH3030	室温	685	—	30	—	—	—	—	—	—	—
GH4033	700	685	—	15	20	—	—	700	430 (410)	60 (80)	—
GH4080A	室温	1000	620	20	—	—	≥285	750	340	30	—
GH4090	650	820	590	8	—	—	—	870	140	30	—
GH4169	室温	1270	1030	12	15	—	≥345	650	690	23	4
	650	1000	860	12	15	—	—				

4. 高温合金冷拉棒材交货状态下的硬度 (表 16-9)

表 16-9 高温合金冷拉棒材交货状态下的硬度 (GB/T 14994—2008)

交货状态	合金牌号	硬度 HBW	交货状态	合金牌号	硬度 HBW
固溶处理	GH2036	302	固溶处理	GH4090	320
	GH2132	201	冷拉态	GH4080A	365
	GH4080A	325		GH4090	351

16.1.4 高温合金环件毛坯的力学性能 (表 16-10)

表 16-10 高温合金环件毛坯的力学性能 (YB/T 5352—2006)

牌 号		热处理制度	瞬时拉伸性能						室温冲击 韧度 $\alpha_K$ / (J/cm <sup>2</sup> ) $\geq$	室温硬度 HBW	高温持久性能		
			试验 温度 /℃	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断面收 缩率 $Z$ (%)	试验 温度 /℃			应力/ (N/mm <sup>2</sup> )	时间 /h $\geq$	
													$\geq$
GH1140	原牌号 CH140	1080℃, 空冷	室温	617	—	40	45	—	—	—	—		
			800	245		40	50						
GH2036	原牌号 GH36	1140℃ 或 1130℃ 保温 1h20min, 水冷; 650 ~ 670℃ 保温 14 ~ 16h 升温至 770 ~ 800℃ 保温 14 ~ 20h, 空冷	室温	833	588	15	20	29.4	277 ~ 311	650	372	35	
											343	100	
GH2132	原牌号 GH132	980 ~ 990℃ 保温 1 ~ 2h, 油冷; 710 ~ 720℃ 保温 16h, 空冷	室温	931	617	20	30	29.4	255 ~ 321	650	392	100	
			650	735	—	15	—	—					
GH2135	原牌号 GH135	1140℃ 保温 4h, 空 冷; 830℃ 保温 8h, 空 冷; 650℃ 保温 16h, 空冷	室温	882	588	13	16	29.4	255 ~ 321	750	343	50	
				804	588	10	13	—			294	100	
GH3030	原牌号 GH30	980 ~ 1020℃, 空 冷	室温	637	—	30	—	—	—	—	—	—	
			700	—		30							
GH4033	原牌号 GH33	1080℃ 保温 8h, 空 冷; 750℃ 保温 16h, 空冷	室温	882	588	13	16	29.4	255 ~ 321	750	343	50	
				804	588	10	13	29.4			294	100	

注: GH2036 合金的 1130℃ 固溶温度仅适用于电炉 + 电渣工艺生产的产品。

16.1.5  高温合金锻制圆饼的力学性能(表 16-11)

表 16-11  高温合金锻制圆饼的力学性能(YB/T 5351—2006)

牌  号		热处理制度	试验温度 /℃	瞬时拉伸性能					室温硬度 HBW	高温持久性能		
				抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	断面收缩率 $Z$ (%)	室温冲击 韧性 $a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		试验温度 /℃	应力/ (N/mm <sup>2</sup> )	时间 /h
				≥							≥	
GH2036	GH36	1140℃ 或 1130℃ 保温 1h20min, 水冷 + 650 ~ 670℃ 保温 14 ~ 16h, 然后升温 至 770 ~ 800℃ 保温 14 ~ 20h, 空冷	室温	833	588	15.0	20.0	29.4	277 ~ 311	650	372	35
											343	100
GH2132	GH132	980 ~ 1000℃ 保温 1 ~ 2h, 油冷 + 700 ~ 720℃ 保温 12 ~ 16h, 空冷	室温	931	617	20.0	40.0	29.4	255 ~ 321	650	392	100
			650	735	—	15.0	20.0					
GH2135	GH135	1140℃ 保温 4h, 空 冷 + 830℃ 保温 8h + 650℃ 保温 16h, 空冷	室温	882	588	13.0	16.0	29.4	255 ~ 321	750	294	100
				804	588	10.0	13.0				343	50

牌 号		热处理制度	试验温度 /℃	瞬时拉伸性能					室温冲击 韧度 $\alpha_K$ / (J/cm <sup>2</sup> )	室温硬度 HBW	高温持久性能		
				抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 A(%)	断面收 缩率 Z(%)	试验 温度 /℃			应力/ (N/mm <sup>2</sup> )	时间 /h	
													≥
新牌号	原牌号	980℃保温 1h, 油 冷 + 720℃保温 16h, 空冷	室温	931	686	15.0	20.0	29.4	255 ~ 323	650 700	392 294	100 100	
GH2136	GH136	1080℃保温 8h, 空 冷 + 750℃保温 16h, 空冷	室温	882	588	13	16	29.4	255 ~ 321	750	294	100	
GH4033	GH33			804	588	10	13				343	50	
GH4133	GH33A	1080℃保温 8h, 空 冷 + 750℃保温 16h, 空冷	室温	1058	735	16.0	18.0	39.2	285 ~ 363	750	294	100	
											343	50	

16.1.6 铸造高温合金母合金的力学性能 (表 16-12)



表 16-12  铸造高温合金母合金的力学性能（YB/T 5248—1993）

合金牌号		试样状态	拉 伸 性 能					持 久 性 能			
			试验温度 /℃	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比 例延伸强 度 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸 长率 $A$ (%)	断后收 缩率 $Z$ (%)	试验温度 /℃	应力/ (N/mm <sup>2</sup> )	时间/ h	断后伸 长率 $A$ (%)
K211	K11	900℃保温 5h, 空冷						800	137 118	(100) (200)	— —
K213	K13	1100℃保温 4h, 空冷	700 或 750	627 588	— —	6.0 4.0	10.0 8.0	700 或 750	490 372	40 80	— —
K214	K14	1100℃保温 5h, 空冷			—			850	245	60	—
K232	K32	1100℃保温 3 ~ 5h, 空冷; 800℃保温 16h, 空冷	20	688	—	4.0	6.0	750	392	50	—
K273		铸态	650	490	—	5.0	—	650	421	80	—
K401	K1	1120℃保温 10h, 空冷						850	245	60	—
K403	K3	(1210 ± 10)℃保温 4h, 空 冷; 或铸态	800	784	—	2.0	3.0	750 975	647 196	50 40	— —
K405	K5	铸态	900	637	—	6.0	8.0	750 900 或 950	686 或 706 314 216 或 235	45 23 80 80 23	— — — — —

(续)

合金牌号		试样状态	拉伸性能					持久性能			
			试验温度 /℃	抗拉强度 $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	断后收缩率 Z (%)	试验温度 /℃	应力/ (N/mm <sup>2</sup> )	时间/ h	断后伸长率 A (%)
K406	K6	(980±10)℃保温5h, 空冷	800	666	—	4.0	8.0	850	245 或 274	100 50	— —
K409	K9	(1080±10)℃保温4h, 空冷; (900±10)℃, 10h, 空冷						760 980	588 202	23 30	— —
K412	K12	1150℃保温7h, 空冷						800	245	40	—
K417	K17	铸态	900	637		6.0	8.0	900	314	70	—
K417C	K17C							或 950	235	40	—
K418	K18	铸态	20 或 800	755 755	688 —	3.0 4.0	— 6.0	750 或 800	608 490	40 45	(3.0) (3.0)
K419	K19				—	—	—	686 255	45 80	— —	
K438	K38	1120℃保温2h, 空冷, 800℃保温24h, 空冷	800	784	—	3.0	3.0	815 850	421 363	70 70	— —
K640	K40	铸态	—	—	—	—	—	816	207	15	6.0

注: 1. 表中带有“或”的条件是选择的条件, 即检验时可任选一组。  
2. 表中括号中的数值作为积累数据, 不作判废依据。

16.2 耐蚀合金的力学性能

16.2.1 耐蚀合金板带材的力学性能

1. 耐蚀合金冷轧薄板的力学性能（表 16-13）

表 16-13 耐蚀合金冷轧薄板的力学性能（YB/T 5354—2006）

合金牌号	推荐固溶处理 温度/℃	力学性能		
		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$		
NS111	1000 ~ 1060	520	205	30
NS112	1100 ~ 1170	450	170	30
NS131	1160 ~ 1210	590	240	30
NS141	1000 ~ 1050	540	215	35
NS142	1020 ~ 1070	585	240	30
NS311	1050 ~ 1100	570	245	40
NS312	1000 ~ 1050	550	240	30
NS313	1100 ~ 1160	550	195	30
NS314	1080 ~ 1130	520	195	35
NS321	1140 ~ 1190	690	310	40
NS322	1040 ~ 1090	760	350	40
NS331	1050 ~ 1100	540	195	35
NS333	1160 ~ 1210	690	285	40
NS334	1150 ~ 1200	690	315	30
NS335	1050 ~ 1100	690	275	40
NS336	1100 ~ 1150	690	275	30

2. 耐蚀合金冷轧带的力学性能（表 16-14）

表 16-14 耐蚀合金冷轧带的力学性能（YB/T 5355—2006）

合金牌号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度
		$\geq$			
NS111 NS112	退火	520	205	30	—
NS142	退火	585	240	30	$\leq 95\text{HRB}$
NS311	固溶	570	245	45	—
	1/2H	805	—	10	—

(续)

合金牌号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度
		$\geq$			
NS312 NS315	退火	505	240	30	—
	1/4H	—	—	—	88~94HRB
	1/2H	—	—	—	93~98HRB
	3/4H	—	—	—	97HRB~25HRC
	H	860	620	2	—
NS321	退火	795	345	45	100HRB
NS322	退火	760	350	40	100HRB
NS333	固溶	690	315	30	—
NS336	退火	830	415	30	—
	固溶	690	275	30	—

16.2.2 耐蚀合金棒材的力学性能

1. 耐蚀合金棒的力学性能（表 16-15）

表 16-15 耐蚀合金棒的力学性能（GB/T 15008—2008）

合金牌号	推荐的固溶 处理温度 /℃	拉伸性能		
		抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$		
NS111	1000~1060	515	205	30
NS112	1100~1170	450	170	30
NS113	1000~1050	515	205	30
NS131	1150~1200	590	240	30
NS141	1000~1050	540	215	35
NS142	1000~1050	590	240	30
NS143	1000~1050	540	215	35
NS311	1050~1100	570	245	40
NS312	1000~1050	550	240	30
NS313	1100~1150	550	195	30
NS314	1080~1120	520	195	35
NS315	1000~1050	550	240	30
NS321	1140~1190	690	310	40

(续)

合金牌号	推荐的固溶 处理温度 /℃	拉 伸 性 能		
		抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$		
NS322	1040 ~ 1090	760	350	40
NS331	1050 ~ 1100	540	195	35
NS332	1160 ~ 1210	735	295	30
NS333	1160 ~ 1210	690	315	30
NS334	1150 ~ 1200	690	285	40
NS335	1050 ~ 1100	690	275	40
NS336	1100 ~ 1150	690	275	30
NS341	1050 ~ 1100	590	195	40

2. NS411 的力学性能 (表 16-16)

表 16-16 NS411 的力学性能 (GB/T 15008—2008)

合金 牌号	推荐的固溶处 理温度/℃	拉 伸 性 能			冲击试验	硬度 HRC
		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	冲击吸收 功 $A_{KU}/J$	
		$\geq$				
NS411	1080 ~ 1100(水冷), 750 ~ 780(8h,空冷), 620 ~ 650(8h,空冷)	910	690	20	$\geq 80$	$\geq 32$

16.2.3 耐蚀合金锻件的力学性能 (表 16-17)

表 16-17 耐蚀合金锻件的力学性能 (YB/T 5264—1993)

合金牌号	推荐热处理 温度/℃	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$		
NS111	1000 ~ 1060	515	205	30
NS112	1100 ~ 1170	450	170	30
NS131	1150 ~ 1200	590	240	30
NS335	1020 ~ 1120	650	240	40

第 17 章 铝及铝合金的力学性能

17.1 铝及铝合金板带材的力学性能

17.1.1 一般工业用铝及铝合金板带材的力学性能（表 17-1）

表 17-1 一般工业用铝及铝合金板带材的力学性能（GB/T 3880.2—2006）

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
1A97	—	H112	H112	>4.50 ~ 80.00	附实测值				—
1A93		F	—	>4.50 ~ 150.00	—				—
1A90 1A85	—	H112	H112	>4.50 ~ 12.50	60	—	21	—	—
				>12.50 ~ 20.00			—	19	—
				>20.00 ~ 80.00			附实测值		
		F	—	>4.50 ~ 150.00	—			—	
1235	—	H12 H22	H12 H22	>0.20 ~ 0.30	95 ~ 130	—	2	—	—
				>0.30 ~ 0.50			3	—	—
				>0.50 ~ 1.50			6	—	—
				>1.50 ~ 3.00			8	—	—
				>3.00 ~ 4.50			9	—	—
		H14 H24	H14 H24	>0.20 ~ 0.30	115 ~ 150	—	1	—	—
				>0.30 ~ 0.50			2	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			4	—	—
		H16 H26	H16 H26	>0.20 ~ 0.50	130 ~ 165	—	1	—	—
				>0.50 ~ 1.50			2	—	—
				>1.50 ~ 4.00			3	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1235	—	H18	H18	>0.20~0.50	145	—	1	—	—
				>0.50~1.50			2	—	—
				>1.50~3.00			3	—	—
1070	—	O	O	>0.20~0.30	55~95	—	15	—	0t
				>0.30~0.50			20	—	0t
				>0.50~0.80			25	—	0t
				>0.80~1.50		15	30	—	0t
				>1.50~6.00			35	—	0t
				>6.00~12.50			35	—	—
				>12.50~50.00			—	30	—
		H12 H22	H12 H22	>0.20~0.30	70~100	—	2	—	0t
				>0.30~0.50			3	—	0t
				>0.50~0.80			4	—	0t
				>0.80~1.50		55	6	—	0t
				>1.50~3.00			8	—	0t
				>3.00~6.00			9	—	0t
		H14 H24	H14 H24	>0.20~0.30	85~120	—	1	—	0.5t
				>0.30~0.50			2	—	0.5t
				>0.50~0.80			3	—	0.5t
				>0.80~1.50		65	4	—	1.0t
				>1.50~3.00			5	—	1.0t
				>3.00~6.00			6	—	1.0t
		H16 H26	H16 H26	>0.20~0.50	100~135	—	1	—	1.0t
				>0.50~0.80			2	—	1.0t
				>0.80~1.50		75	3	—	1.5t
				>1.50~4.00			4	—	1.5t
		H18	H18	>0.20~0.50	120	—	1	—	—
				>0.50~0.80			2	—	—



(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1070	—	H18	H18	>0.80 ~ 1.50	120	—	3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			4	—	—
		H112	H112	>4.50 ~ 6.00	75	35	13	—	—
				>6.00 ~ 12.50	70	35	15	—	—
				>12.50 ~ 25.00	60	25	—	20	—
				>25.00 ~ 75.00	55	15	—	25	—
				F	—	>2.50 ~ 150.00	—		
		1060	—	O	O	>0.20 ~ 0.30	60 ~ 100	15	15
>0.30 ~ 0.50	18					—			—
>0.50 ~ 1.50	23					—			—
>1.50 ~ 6.00	25					—			—
>6.00 ~ 80.00	25					22			—
H12 H22	H12 H22			>0.50 ~ 1.50	80 ~ 120	60	6	—	—
				>1.50 ~ 6.00			12	—	—
H14 H24	H14 H24			>0.20 ~ 0.30	95 ~ 135	70	1	—	—
				>0.30 ~ 0.50			2	—	—
				>0.50 ~ 0.80			2	—	—
				>0.80 ~ 1.50			4	—	—
				>1.50 ~ 3.00			6	—	—
				>3.00 ~ 6.00			10	—	—
H16 H26	H16 H26			>0.20 ~ 0.30	110 ~ 155	75	1	—	—
				>0.30 ~ 0.50			2	—	—
				>0.50 ~ 0.80			2	—	—
				>0.80 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 4.00			5	—	—
H18	H18			>0.20 ~ 0.30	125	85	1	—	—
				>0.30 ~ 0.50			2	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1060	—	H18	H18	>1.50~3.00	125	85	4	—	—
		H112	H112	>4.50~6.00	75	—	10	—	—
				>6.00~12.50	75		10	—	—
				>12.50~40.00	70		—	18	—
				>40.00~80.00	60		—	22	—
				F	—		>2.50~150.00	—	
1050	—	O	O	>0.20~0.50	60~100	—	15	—	0t
				>0.50~0.80			20	—	0t
				>0.80~1.50		20	25	—	0t
				>1.50~6.00			30	—	0t
				>6.00~50.00			28	28	—
		H12 H22	H12 H22	>0.20~0.30	80~120	—	2	—	0t
				>0.30~0.50			3	—	0t
				>0.50~0.80			4	—	0t
				>0.80~1.50		65	6	—	0.5t
				>1.50~3.00			8	—	0.5t
				>3.00~6.00			9	—	0.5t
		H14 H24	H14 H24	>0.20~0.30	95~130	—	1	—	0.5t
				>0.30~0.50			2	—	0.5t
				>0.50~0.80			3	—	0.5t
				>0.80~1.50		75	4	—	1.0t
				>1.50~3.00			5	—	1.0t
				>3.00~6.00			6	—	1.0t
		H16 H26	H16 H26	>0.20~0.50	120~150	—	1	—	2.0t
				>0.50~0.80		85	2	—	2.0t
				>0.80~1.50			3	—	2.0t
				>1.50~4.00			4	—	2.0t
		H18	H18	>0.20~0.50	130	—	1	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1050	—	H18	H18	>0.50~0.80	130	—	2	—	—
				>0.80~1.50			3	—	—
				>1.50~3.00			4	—	—
		H112	H112	>4.50~6.00	85	45	10	—	—
				>6.00~12.50	80	45	10	—	—
				>12.50~25.00	70	35	—	16	—
				>25.00~50.00	65	30	—	22	—
				>50.00~75.00	65	30	—	22	—
		F	—	>2.50~150.00	—				—
1050A	—	O	O	>0.20~0.50	>65~95	20	20	—	0t
				>0.50~1.50			22	—	0t
				>1.50~3.00			26	—	0t
				>3.00~6.00			29	—	0.5t
				>6.00~12.50			35	—	—
				>12.50~50.00				32	
		H12	H12	>0.20~0.50	>85~125	65	2	—	0t
				>0.50~1.50			4	—	0t
				>1.50~3.00			5	—	0.5t
				>3.00~6.00			7	—	1.0t
		H22	H22	>0.20~0.50	>85~125	55	4	—	0t
				>0.50~1.50			5	—	0t
				>1.50~3.00			6	—	0.5t
				>3.00~6.00			11	—	1.0t
		H14	H14	>0.20~0.50	>105~145	85	2	—	0t
				>0.50~1.50			3	—	0.5t
				>1.50~3.00			4	—	1.0t
				>3.00~6.00			5	—	1.5t
		H24	H24	>0.20~0.50	>105~145	75	3	—	0t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1050A	—	H24	H24	>0.50 ~ 1.50	>105 ~ 145	75	4	—	0.5t
				>1.50 ~ 3.00			5	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			8	—	1.5t
		H16	H16	>0.20 ~ 0.50	>120 ~ 160	100	1	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	1.0t
				>1.50 ~ 4.00			3	—	1.5t
		H26	H26	>0.20 ~ 0.50	>120 ~ 160	90	2	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			3	—	1.0t
				>1.50 ~ 4.00			4	—	1.5t
		H18	H18	>0.20 ~ 0.50	140	120	1	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	2.0t
				>1.50 ~ 3.00			2	—	3.0t
		H112	H112	>4.50 ~ 12.50	75	30	20	—	—
				>12.50 ~ 75.00	70	25	—	20	—
		F	—	>2.50 ~ 150.00	—				—
1145	—	O	O	>0.20 ~ 0.50	60 ~ 100	—	15	—	—
				>0.50 ~ 0.80			20	—	—
				>0.80 ~ 1.50		20	25	—	—
				>1.50 ~ 6.00			30	—	—
				>6.00 ~ 10.00			28	—	—
		H12 H22	H12 H22	>0.20 ~ 0.30	80 ~ 120	—	2	—	—
				>0.30 ~ 0.50			3	—	—
				>0.50 ~ 0.80			4	—	—
				>0.80 ~ 1.50		65	6	—	—
				>1.50 ~ 3.00			8	—	—
				>3.00 ~ 4.50			9	—	—
		H14 H24	H14 H24	>0.20 ~ 0.30	95 ~ 125	—	1	—	—
				>0.30 ~ 0.50			2	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1145	—	H14 H24	H14 H24	>0.50~0.80	95~125	—  75	3	—	—
				>0.80~1.50			4	—	—
				>1.50~3.00			5	—	—
				>3.00~4.50			6	—	—
		H16 H26	H16 H26	>0.20~0.50	120~145	—  85	1	—	—
				>0.50~0.80			2	—	—
				>0.80~1.50			3	—	—
				>1.50~4.50			4	—	—
		H18	H18	>0.20~0.50	125	—	1	—	—
				>0.50~0.80			2	—	—
				>0.80~1.50			3	—	—
				>1.50~4.50			4	—	—
		H112	H112	>4.50~6.50	85	45	10	—	—
				>6.50~12.50	85	45	10	—	—
				>12.50~25.00	70	35	—	16	—
		F	—	>2.50~150.00	—				—
1100	—	O	O	>0.20~0.30	75~105	25	15	—	0t
				>0.30~0.50			17	—	0t
				>0.50~1.50			22	—	0t
				>1.50~6.00			30	—	0t
				>6.00~80.00			28	25	0t
		H12 H22	H12 H22	>0.20~0.50	95~130	75	3	—	0t
				>0.50~1.50			5	—	0t
				>1.50~6.00			8	—	0t
		H14 H24	H14 H24	>0.20~0.30	110~145	95	1	—	0t
				>0.30~0.50			2	—	0t
				>0.50~1.50			3	—	0t
				>1.50~4.00			5	—	0t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
1100	—	H16 H26	H16 H26	>0.20~0.30	130~165	115	1	—	2t
				>0.30~0.50			2	—	2t
				>0.50~1.50			3	—	2t
				>1.50~4.00			4	—	2t
		H18	H18	>0.20~0.50	150	—	1	—	—
				>0.50~1.50			2	—	—
				>1.50~3.00			4	—	—
		H112	H112	>6.00~12.50	90	50	9	—	—
				>12.50~40.00	85	40	—	12	—
				>40.00~80.00	80	30	—	18	—
		F	—	>2.50~150.00	—				—
1200	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	75~105	25	19	—	0t
				>0.50~1.50			21	—	0t
				>1.50~3.00			24	—	0t
				>3.00~6.00			28	—	0.5t
				>6.00~12.50			33	—	1.0t
				>12.50~50.00			—	30	—
		H12	H12	>0.20~0.50	95~135	75	2	—	0t
				>0.50~1.50			4	—	0t
				>1.50~3.00			5	—	0.5t
				>3.00~6.00			6	—	1.0t
		H14	H14	>0.20~0.50	115~155	95	2	—	0t
				>0.50~1.50			3	—	0.5t
				>1.50~3.00			4	—	1.0t
				>3.00~6.00			5	—	1.5t
		H16	H16	>0.20~0.50	130~170	115	1	—	0.5t
				>0.50~1.50			2	—	1.0t
				>1.50~4.00			3	—	1.5t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
1200	—	H18	H18	>0.20~0.50	150	130	1	—	1.0t
				>0.50~1.50			2	—	2.0t
				>1.50~3.00			2	—	3.0t
		H22	H22	>0.20~0.50	95~135	65	4	—	0t
				>0.50~1.50			5	—	0t
				>1.50~3.00			6	—	0.5t
				>3.00~6.00			10	—	1.0t
		H24	H24	>0.20~0.50	115~155	90	3	—	0t
				>0.50~1.50			4	—	0.5t
				>1.50~3.00			5	—	1.0t
				>3.00~6.00			7	—	1.5t
		H26	H26	>0.20~0.50	130~170	105	2	—	0.5t
				>0.50~1.50			3	—	1.0t
				>1.50~4.00			4	—	1.5t
		H112	H112	6.00~12.50	85	35	16	—	—
				>12.50~80.00	80	30	—	16	—
		F	—	>2.50~150.00	—				—
2017	正常 包铝 或工 艺包 铝	O	O	>0.50~1.50	≤215	≤110	12	—	0.5t
				>1.50~3.00					1.0t
				>3.00~6.00					1.5t
				>12.50~25.00			—	12	—
			T42	>0.50~1.50	355	195	15	—	—
				>1.50~3.00			17	—	—
				>3.00~6.50			15	—	—
				>6.50~12.50	335	185	12	—	—
				>12.50~25.00		185	—	12	—
		T3	T3	>0.50~1.50	375	215	15	—	2.5t
				>1.50~3.00			17	—	3t



(续)

牌号	包铝分类	供应状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
2017	正常包铝 或工艺包铝	T3	T3	>3.00~6.00	375	215	15	—	3.5t
		T4	T4	>0.50~1.50	355	195	15	—	2.5t
				>1.50~3.00			17	—	3t
				>3.00~6.00			15	—	3.5t
		H112	T42	>4.50~6.50	355	195	15	—	—
				>6.50~12.50		185	12	—	—
				>12.50~25.00		185	—	12	—
				>25.00~40.00	330	195	—	8	—
				>40.00~70.00	310	195	—	6	—
				>70.00~80.00	285	195	—	4	—
		F	—	>4.50~150.00	—	—	—	—	—
2A11	正常包铝 或工艺包铝	O	O	>0.50~3.00	≤225	—	12	—	—
				>3.00~10.00	≤235	—	12	—	—
			T42	>0.50~3.00	350	185	15	—	—
				>3.00~10.00	355	195	15	—	—
		T3	T3	>0.50~1.50	375	215	15	—	—
				>1.50~3.00			17	—	—
				>3.00~10.00			15	—	—
		T4	T4	>0.50~3.00	360	185	15	—	—
				>3.00~10.00	370	195	15	—	—
		H112	T42	>4.50~10.00	355	195	15	—	—
				>10.00~12.50	370	215	11	—	—
				>12.50~25.00	370	215	—	11	—
				>25.00~40.00	330	195	—	8	—
				>40.00~70.00	310	195	—	6	—
				>70.00~80.00	285	195	—	4	—
		F	—	>4.50~150.00	—				—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
2014	工艺 包铝 或不 包铝	O	O	>0.50 ~ 12.50	≤220	≤110	16	—	—
				>12.50 ~ 25.00	≤220	—	—	9	—
			T62	>0.50 ~ 1.00	440	395	6	—	—
				>1.00 ~ 6.00	455	400	7	—	—
				>6.00 ~ 12.50	460	405	7	—	—
				>12.50 ~ 25.00	460	405	—	5	—
			T42	>0.50 ~ 12.50	400	235	14	—	—
				>12.50 ~ 25.00	400	235	—	12	—
		T6	T6	>0.50 ~ 1.00	440	395	6	—	—
				>1.00 ~ 6.00	455	400	7	—	—
				>6.00 ~ 12.50	460	405	7	—	—
		T4	T4	>0.50 ~ 6.00	405	240	14	—	—
				>6.00 ~ 12.50	400	250	14	—	—
		T3	T3	>0.50 ~ 1.00	405	240	14	—	—
				>1.00 ~ 6.00	405	250	14	—	—
		F	—	>4.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
	正常 包铝	O	O	>0.50 ~ 12.50	≤205	≤95	16	—	—
				>12.50 ~ 25.00	≤220	—	—	9	—
			T62	>0.50 ~ 1.00	425	370	7	—	—
				>1.00 ~ 12.50	440	395	8	—	—
				>12.50 ~ 25.00	460	405	—	5	—
			T42	>0.50 ~ 1.00	370	215	14	—	—
				>1.00 ~ 12.50	395	235	15	—	—
				>12.50 ~ 25.00	400	235	—	12	—
		T6	T6	>0.50 ~ 1.00	425	370	7	—	—
				>1.00 ~ 12.50	440	395	8	—	—
		T4	T4	>0.50 ~ 1.00	370	215	14	—	—
				>1.00 ~ 6.00	395	235	15	—	—

(续)

牌号	包铝分类	供应状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm	
							$A_{50mm}$	A		
					≥					
2014	正常包铝	T4	T4	> 6.00 ~ 12.50	395	250	15	—	—	
		T3	T3	> 0.50 ~ 1.00	380	235	14	—	—	
				> 1.00 ~ 6.00	395	240	15	—	—	
		F	—	> 4.50 ~ 150.00	—				—	
2024	不包铝	O	O	> 0.50 ~ 12.50	≤220	≤95	12	—	—	
				> 12.50 ~ 45.00	≤220	—	—	10	—	
			T42	> 0.50 ~ 6.00	425	260	15	—	—	
				> 6.00 ~ 12.50	425	260	12	—	—	
				> 12.50 ~ 25.00	420	260	—	7	—	
			T62	> 0.50 ~ 12.50	440	345	5	—	—	
		> 12.50 ~ 25.00		435	345	—	4	—		
		T3	T3	> 0.50 ~ 6.00	435	290	15	—	—	
				> 6.00 ~ 12.50	440	290	12	—	—	
		T4	T4	> 0.50 ~ 6.00	425	275	15	—	—	
		F	—	> 4.50 ~ 150.00	—				—	
		正常包铝 或工艺包铝	O	O	> 0.50 ~ 1.50	≤205	≤95	12	—	—
					> 1.50 ~ 12.50	≤220	≤95	12	—	—
					> 12.50 ~ 45.00	220	—	—	10	—
	T42			> 0.50 ~ 1.50	395	235	15	—	—	
				> 1.50 ~ 6.00	415	250	15	—	—	
				> 6.00 ~ 12.50	415	250	12	—	—	
				> 12.50 ~ 25.00	420	260	—	7	—	
				> 25.00 ~ 40.00	415	260	—	6	—	
	T62			> 0.50 ~ 1.50	415	325	5	—	—	
				> 1.50 ~ 12.50	425	335	5	—	—	
	T3	T3	> 0.50 ~ 1.50	405	270	15	—	—		
			> 1.50 ~ 6.00	420	275	15	—	—		
			> 6.00 ~ 12.50	425	275	12	—	—		

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
2024	正常包 铝或工 艺包铝	T4	T4	>0.50~1.50	400	245	15	—	—
				>1.50~6.00	420	275	15	—	—
		F	—	>4.50~150.00	—				
3003	—	O	O	>0.20~0.50	95~140	35	15	—	0t
				>0.50~1.50			17	—	0t
				>1.50~3.00			20	—	0t
				>3.00~6.00			23	—	1.0t
				>6.00~12.50			24	—	1.5t
				>12.50~50.00			—	23	—
		H12	H12	>0.20~0.50	120~160	90	3	—	0t
				>0.50~1.50			4	—	0.5t
				>1.50~3.00			5	—	1.0t
				>3.00~6.00			6	—	1.0t
		H14	H14	>0.20~0.50	145~195	125	2	—	0.5t
				>0.50~1.50			2	—	1.0t
				>1.50~3.00			3	—	1.0t
				>3.00~6.00			4	—	2.0t
		H16	H16	>0.20~0.50	170~210	150	1	—	1.0t
				>0.50~1.50			2	—	1.5t
				>1.50~4.00			2	—	2.0t
		H18	H18	>0.20~0.50	190	170	1	—	1.5t
				>0.50~1.50			2	—	2.5t
				>1.50~4.00			2	—	3.0t
		H22	H22	>0.20~0.50	120~160	80	6	—	0t
				>0.50~1.50			7	—	0.5t
				>1.50~3.00			8	—	1.0t
				>3.00~6.00			9	—	1.0t
		H24	H24	>0.20~0.50	145~195	115	4	—	0.5t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
3003	—	H24	H24	>0.50 ~ 1.50	145 ~ 195	115	4	—	1.0t
				>1.50 ~ 3.00			5	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			6	—	2.0t
		H26	H26	>0.20 ~ 0.50	170 ~ 210	140	2	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			3	—	1.5t
				>1.50 ~ 4.00			3	—	2.0t
		H28	H28	>0.20 ~ 0.50	190	160	2	—	1.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	2.5t
				>1.50 ~ 3.00			3	—	3.0t
		H112	H112	>6.00 ~ 12.50	115	70	10	—	—
				>12.50 ~ 80.00	100	40	—	18	—
		F	—	>2.50 ~ 150.00	—				—
3004 3104	—	O H111	O H111	>0.20 ~ 0.50	155 ~ 200	60	13	—	0t
				>0.50 ~ 1.50			14	—	0t
				>1.50 ~ 3.00			15	—	0t
				>3.00 ~ 6.00			16	—	1.0t
				>6.00 ~ 12.50			16	—	2.0t
				>12.50 ~ 50.00			—	14	—
		H12	H12	>0.20 ~ 0.50	190 ~ 240	155	2	—	0t
				>0.50 ~ 1.50			3	—	0.5t
				>1.50 ~ 3.00			4	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			5	—	1.5t
		H14	H14	>0.20 ~ 0.50	220 ~ 265	180	1	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	1.0t
				>1.50 ~ 3.00			2	—	1.5t
				>3.00 ~ 6.00			3	—	2.0t
		H16	H16	>0.20 ~ 0.50	240 ~ 285	200	1	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			1	—	1.5t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
3004 3104	—	H16	H16	>1.50~3.00	240~285	200	2	—	2.5t
		H18	H18	>0.20~0.50	260	230	1	—	1.5t
				>0.50~1.50			1	—	2.5t
				>1.50~3.00			2	—	—
		H22 H32	H22 H32	>0.20~0.50	190~240	145	1	—	0t
				>0.50~1.50			5	—	0.5t
				>1.50~3.00			6	—	1.0t
				>3.00~6.00			7	—	1.5t
		H24 H34	H24 H34	>0.20~0.50	220~265	170	3	—	0.5t
				>0.50~1.50			4	—	1.0t
				>1.50~3.00			4	—	1.5t
		H26 H36	H26 H36	>0.20~0.50	240~285	190	3	—	1.0t
				>0.50~1.50			3	—	1.5t
				>1.50~3.00			3	—	2.5t
		H28 H38	H28 H38	>0.20~0.50	260	220	2	—	1.5t
				>0.50~1.50			3	—	2.5t
		H112	H112	>6.00~12.50	160	60	7	—	—
				>12.50~40.00			—	6	—
				>40.00~80.00			—	6	—
		F	—	>2.50~80.00	—				—
3005	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	115~165	45	12	—	0t
				>0.50~1.50			14	—	0t
				>1.50~3.00			16	—	0.5t
				>3.00~6.00			19	—	1.0t
		H12	H12	>0.20~0.50	145~195	125	3	—	0t
				>0.50~1.50			4	—	0.5t
				>1.50~3.00			4	—	1.0t
				>3.00~6.00			5	—	1.5t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
3005	—	H14	H14	>0.20~0.50	170~215	150	1	—	0.5t
				>0.50~1.50			2	—	1.0t
				>1.50~3.00			2	—	1.5t
				>3.00~6.00			3	—	2.0t
		H16	H16	>0.20~0.50	195~240	175	1	—	1.0t
				>0.50~1.50			2	—	1.5t
				>1.50~4.00			2	—	2.5t
		H18	H18	>0.20~0.50	220	200	1	—	1.5t
				>0.50~1.50			2	—	2.5t
				>1.50~3.00			2	—	—
		H22	H22	>0.20~0.50	145~195	110	5	—	0t
				>0.50~1.50			5	—	0.5t
				>1.50~3.00			6	—	1.0t
				>3.00~6.00			7	—	1.5t
		H24	H24	>0.20~0.50	170~215	130	4	—	0.5t
				>0.50~1.50			4	—	1.0t
				>1.50~3.00			4	—	1.5t
		H26	H26	>0.20~0.50	195~240	160	3	—	1.0t
				>0.50~1.50			3	—	1.5t
				>1.50~3.00			3	—	2.5t
		H28	H28	>0.20~0.50	220	190	2	—	1.5t
				>0.50~1.50			2	—	2.5t
				>1.50~3.00			3	—	—
3105	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	100~155	40	14	—	0t
				>0.50~1.50			15	—	0t
				>1.50~3.00			17	—	0.5t
		H12	H12	>0.20~0.50	130~180	105	3	—	1.5t
				>0.50~1.50			4	—	1.5t



(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
3105	—	H12	H12	>1.50~3.00	130~180	105	4	—	1.5t
		H14	H14	>0.20~0.50	150~200	130	2	—	2.5t
				>0.50~1.50			2	—	2.5t
				>1.50~3.00			2	—	2.5t
		H16	H16	>0.20~0.50	175~225	160	1	—	—
				>0.50~1.50			2	—	—
				>1.50~3.00			2	—	—
		H18	H18	>0.20~3.00	195	180	1	—	—
		H22	H22	>0.20~0.50	130~180	105	6	—	—
				>0.50~1.50			6	—	—
				>1.50~3.00			7	—	—
		H24	H24	>0.20~0.50	150~200	120	4	—	2.5t
				>0.50~1.50			4	—	2.5t
				>1.50~3.00			5	—	2.5t
		H26	H26	>0.20~0.50	175~225	150	3	—	—
				>0.50~1.50			3	—	—
				>1.50~3.00			3	—	—
		H28	H28	>0.20~1.50	195	170	2	—	—
3102	—	H18	H18	>0.20~0.50	160	—	3	—	—
				>0.50~3.00			2	—	—
5182	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	255~315	110	11	—	1.0t
				>0.50~1.50			12	—	1.0t
				>1.50~3.00			13	—	1.0t
		H19	H19	>0.20~0.50	380	320	1	—	—
				>0.50~1.50			1	—	—
5A03	—	O	O	>0.50~4.50	195	100	16	—	—
		H14、H24、 H34	H14、H24、 H34	>0.50~4.50	225	195	8	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
5A03	—	H112	H112	>4.50~10.00	185	80	16	—	—
				>10.00~12.50	175	70	13	—	—
				>12.50~25.00	175	70	—	13	—
				>25.00~50.00	165	60	—	12	—
		F	—	>4.50~150.00	—	—	—	—	—
5A05	—	O	O	0.50~4.50	275	145	16	—	—
		H112	H112	>4.50~10.00	275	125	16	—	—
				>10.00~12.50	265	115	14	—	—
				>12.50~25.00	265	115	—	14	—
				>25.00~50.00	255	105	—	13	—
		F	—	>4.50~150.00	—	—	—	—	—
5A06	工艺 包铝	O	O	0.50~4.50	315	155	16	—	—
		H112	H112	>4.50~10.00	315	155	16	—	—
				>10.00~12.50	305	145	12	—	—
				>12.50~25.00	305	145	—	12	—
				>25.00~50.00	295	135	—	6	—
		F	—	>4.50~150.00	—	—	—	—	—
5082	—	H18 H38	H18 H38	>0.20~0.50	335	—	1	—	—
		H19 H39	H19 H39	>0.20~0.50	355	—	1	—	—
		F	—	>4.50~150.00	—	—	—	—	—
5005	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	100~145	35	15	—	0t
				>0.50~1.50			19	—	0t
				>1.50~3.00			20	—	0t
				>3.00~6.00			22	—	1.0t
				>6.00~12.50			24	—	1.5t
				>12.50~50.00			—	20	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
5005	—	H12	H12	>0.20 ~ 0.50	125 ~ 165	95	2	—	0t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	0.5t
				>1.50 ~ 3.00			4	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			5	—	1.0t
		H14	H14	>0.20 ~ 0.50	145 ~ 185	120	2	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	1.0t
				>1.50 ~ 3.00			3	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			4	—	2.0t
		H16	H16	>0.20 ~ 0.50	165 ~ 205	145	1	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	1.5t
				>1.50 ~ 3.00			3	—	2.0t
				>3.00 ~ 4.00			3	—	2.5t
		H18	H18	>0.20 ~ 0.50	185	165	1	—	1.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	2.5t
				>1.50 ~ 3.00			2	—	3.0t
		H22 H32	H22 H32	>0.20 ~ 0.50	125 ~ 165	80	4	—	0t
				>0.50 ~ 1.50			5	—	0.5t
				>1.50 ~ 3.00			6	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			8	—	1.0t
		H24 H34	H24 H34	>0.20 ~ 0.50	145 ~ 185	110	3	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			4	—	1.0t
				>1.50 ~ 3.00			5	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			6	—	2.0t
		H26 H36	H26 H36	>0.20 ~ 0.50	165 ~ 205	135	2	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			3	—	1.5t
				>1.50 ~ 3.00			4	—	2.0t
				>3.00 ~ 4.00			4	—	2.5t
		H28 H38	H28 H38	>0.20 ~ 0.50	185	160	1	—	1.5t
				>0.50 ~ 1.50			2	—	2.5t
				>1.50 ~ 3.00			3	—	3.0t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
5005	—	H112	H112	>6.00 ~ 12.50	115	—	8	—	—
				>12.50 ~ 40.00	105		—	10	—
				>40.00 ~ 80.00	100		—	16	—
		F	—	>2.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
5052	—	O H111	O H111	>0.20 ~ 0.50	170 ~ 215	65	12	—	0t
				>0.50 ~ 1.50			14	—	0t
				>1.50 ~ 3.00			16	—	0.5t
				>3.00 ~ 6.00			18	—	1.0t
				>6.00 ~ 12.50			19	—	2.0t
				>12.50 ~ 50.00			—	18	—
		H12	H12	>0.20 ~ 0.50	210 ~ 260	160	4	—	—
				>0.50 ~ 1.50			5	—	—
				>1.50 ~ 3.00			6	—	—
				>3.00 ~ 6.00			8	—	—
		H14	H14	>0.20 ~ 0.50	230 ~ 280	180	3	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			4	—	—
				>3.00 ~ 6.00			4	—	—
		H16	H16	>0.20 ~ 0.50	250 ~ 300	210	2	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			3	—	—
				>3.00 ~ 4.00			3	—	—
		H18	H18	>0.20 ~ 0.50	270	240	1	—	—
				>0.50 ~ 1.50			2	—	—
				>1.50 ~ 3.00			2	—	—
		H22 H32	H22 H32	>0.20 ~ 0.50	210 ~ 260	130	5	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			6	—	1.0t
				>1.50 ~ 3.00			7	—	1.5t
				>3.00 ~ 6.00			10	—	1.5t

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm		
							$A_{50mm}$	A			
							≥				
5052	—	H24 H34	H24 H34	>0.20~0.50	230~280	150	4	—	0.5t		
				>0.50~1.50			5	—	1.5t		
				>1.50~3.00			6	—	2.0t		
				>3.00~6.00			7	—	2.5t		
		H26 H36	H26 H36	>0.20~0.50	250~300	180	3	—	1.5t		
				>0.50~1.50			4	—	2.0t		
				>1.50~3.00			5	—	3.0t		
				>3.00~4.00			6	—	3.5t		
		H38	H38	>0.20~0.50	270	210	3	—	—		
				>0.50~1.50			3	—	—		
				>1.50~3.00			4	—	—		
		H112	H112	>6.00~12.50	190	80	7	—	—		
				>12.50~40.00	170	70	—	10	—		
				>40.00~80.00	170	70	—	14	—		
		F	—	>2.50~150.00	—				—		
		5083	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	275~350	125	11	—	0.5t
						>0.50~1.50			12	—	1.0t
						>1.50~3.00			13	—	1.0t
>3.00~6.00	15					—			1.5t		
>6.00~12.50	16					—			2.5t		
>12.50~50.00	—					15			—		
>50.00~80.00	270~345					115	—	14	—		
H12	H12			>0.20~0.50	315~375	250	3	—	—		
				>0.50~1.50			4	—	—		
				>1.50~3.00			5	—	—		
				>3.00~6.00			6	—	—		
H14	H14			>0.20~0.50	340~400	280	2	—	—		
				>0.50~1.50			3	—	—		

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
5083	—	H14	H14	> 1.50 ~ 3.00	340 ~ 400	280	3	—	—
				> 3.00 ~ 6.00			3	—	—
		H16	H16	> 0.20 ~ 0.50	360 ~ 420	300	1	—	—
				> 0.50 ~ 1.50			2	—	—
				> 1.50 ~ 3.00			2	—	—
				> 3.00 ~ 4.00			2	—	—
		H22 H32	H22 H32	> 0.20 ~ 0.50	305 ~ 380	215	5	—	0.5t
				> 0.50 ~ 1.50			6	—	1.5t
				> 1.50 ~ 3.00			7	—	2.0t
				> 3.00 ~ 6.00			8	—	2.5t
		H24 H34	H24 H34	> 0.20 ~ 0.50	340 ~ 400	250	4	—	1.0t
				> 0.50 ~ 1.50			5	—	2.0t
				> 1.50 ~ 3.00			6	—	2.5t
				> 3.00 ~ 6.00			7	—	3.5t
		H26 H36	H26 H36	> 0.20 ~ 0.50	360 ~ 420	280	2	—	—
				> 0.50 ~ 1.50			3	—	—
				> 1.50 ~ 3.00			3	—	—
				> 3.00 ~ 4.00			3	—	—
		H112	H112	> 6.00 ~ 12.50	275	125	12	—	—
				> 12.50 ~ 40.00	275	125	—	10	—
				> 40.00 ~ 50.00	270	115	—	10	—
		F	—	> 4.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
5086	—	O H111	O H111	> 0.20 ~ 0.50	240 ~ 310	100	11	—	0.5t
				> 0.50 ~ 1.50			12	—	1.0t
				> 1.50 ~ 3.00			13	—	1.0t
				> 3.00 ~ 6.00			15	—	1.5t
				> 6.00 ~ 12.50			17	—	2.5t
				> 12.50 ~ 80.00			—	16	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
5086	—	H12	H12	>0.20 ~ 0.50	275 ~ 335	200	3	—	—
				>0.50 ~ 1.50			4	—	—
				>1.50 ~ 3.00			5	—	—
				>3.00 ~ 6.00			6	—	—
		H14	H14	>0.20 ~ 0.50	300 ~ 360	240	2	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			3	—	—
				>3.00 ~ 6.00			3	—	—
		H16	H16	>0.20 ~ 0.50	325 ~ 385	270	1	—	—
				>0.50 ~ 1.50			2	—	—
				>1.50 ~ 3.00			2	—	—
				>3.00 ~ 4.00			2	—	—
		H18	H18	>0.20 ~ 0.50	345	290	1	—	—
				>0.50 ~ 1.50			1	—	—
				>1.50 ~ 3.00			1	—	—
		H22 H32	H22 H32	>0.20 ~ 0.50	275 ~ 335	185	5	—	0.5t
				>0.50 ~ 1.50			6	—	1.5t
				>1.50 ~ 3.00			7	—	2.0t
				>3.00 ~ 6.00			8	—	2.5t
		H24 H34	H24 H34	>0.20 ~ 0.50	300 ~ 360	220	4	—	1.0t
				>0.50 ~ 1.50			5	—	2.0t
				>1.50 ~ 3.00			6	—	2.5t
				>3.00 ~ 6.00			7	—	3.5t
		H26 H36	H26 H36	>0.20 ~ 0.50	325 ~ 385	250	2	—	—
				>0.50 ~ 1.50			3	—	—
				>1.50 ~ 3.00			3	—	—
				>3.00 ~ 4.00			3	—	—
		H112	H112	>6.00 ~ 12.50	250	105	8	—	—



(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
5086	—	H112	H112	> 12.50 ~ 40.00	240	105	—	9	—
				> 40.00 ~ 50.00	240	100	—	12	—
		F	—	> 4.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
6061	—	O	O	0.40 ~ 1.50	≤150	≤85	14	—	0.5t
				> 1.50 ~ 3.00			16	—	1.0t
				> 3.00 ~ 6.00			19	—	1.0t
				> 6.00 ~ 12.50			16	—	2.0t
				> 12.50 ~ 25.00			—	16	—
			T42	0.40 ~ 1.50	205	95	12	—	1.0t
				> 1.50 ~ 3.00			14	—	1.5t
				> 3.00 ~ 6.00			16	—	3.0t
				> 6.00 ~ 12.50			18	—	4.0t
				> 12.50 ~ 40.00			—	15	—
			T62	0.40 ~ 1.50	290	240	6	—	2.5t
				> 1.50 ~ 3.00			7	—	3.5t
				> 3.00 ~ 6.00			10	—	4.0t
				> 6.00 ~ 12.50			9	—	5.0t
				> 12.50 ~ 40.00			—	8	—
		T4	T4	0.40 ~ 1.50	205	110	12	—	1.0t
				> 1.50 ~ 3.00			14	—	1.5t
				> 3.00 ~ 6.00			16	—	3.0t
				> 6.00 ~ 12.50			18	—	4.0t
		T6	T6	0.40 ~ 1.50	290	240	6	—	2.5t
				> 1.50 ~ 3.00			7	—	3.5t
				> 3.00 ~ 6.00			10	—	4.0t
				> 6.00 ~ 12.50			9	—	5.0t
		F	F	> 2.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
6063	—	O	O	0.50 ~ 5.00	≤130	—	20	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度	规定非比例	断后伸长率		弯心 半径 /mm
					$R_m$	延伸强度	(%)		
					/(N/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}$	$A_{50mm}$	A	

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
6082	—	O	O	0.40 ~ 1.50	≤150	≤85	14	—	0.5t
				>1.50 ~ 3.00			16	—	1.0t
				>3.00 ~ 6.00			18	—	1.5t
				>6.00 ~ 12.50			17	—	2.5t
				>12.50 ~ 25.00	≤155	—	—	16	—
			T42	0.40 ~ 1.50	205	95	12	—	1.5t
				>1.50 ~ 3.00			14	—	2.0t
				>3.00 ~ 6.00			15	—	3.0t
				>6.00 ~ 12.50			14	—	4.0t
				>12.50 ~ 25.00			—	13	—
			T62	0.40 ~ 1.50	310	260	6	—	2.5t
				>1.50 ~ 3.00			7	—	3.5t
				>3.00 ~ 6.00			10	—	4.5t
				>6.00 ~ 12.50	300	255	9	—	6.0t
				>12.50 ~ 25.00	295	240	—	8	—
		T4	T4	0.40 ~ 1.50	205	110	12	—	1.5t
				>1.50 ~ 3.00			14	—	2.0t
				>3.00 ~ 6.00			15	—	3.0t
				>6.00 ~ 12.50			14	—	4.0t
		T6	T6	0.40 ~ 1.50	310	260	6	—	2.5t
				>1.50 ~ 3.00			7	—	3.5t
				>3.00 ~ 6.00			10	—	4.5t
				>6.00 ~ 12.50	300	255	9	—	6.0t
		F	F	>4.50 ~ 150.00	—	—	—	—	—
7075	正常 包铝	O	O	>0.50 ~ 1.50	≤250	≤140	10	—	—
				>1.50 ~ 4.00	≤260	≤140	10	—	—
				>4.00 ~ 12.50	≤270	≤145	10	—	—
				>12.50 ~ 25.00	≤275	—	—	9	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
7075	正常 包铝	O	T62	>0.50~1.00	485	415	7	—	—
				>1.00~1.50	495	425	8	—	—
				>1.50~4.00	505	435	8	—	—
				>4.00~6.00	515	440	8	—	—
				>6.00~12.50	515	445	9	—	—
				>12.50~25.00	540	470	—	6	—
		T6	T6	>0.50~1.00	485	415	7	—	—
				>1.00~1.50	495	425	8	—	—
				>1.50~4.00	505	435	8	—	—
				>4.00~6.00	515	440	8	—	—
		F	—	>6.00~100.00	—	—	—	—	—
	不包 铝或 工艺 包铝	O	O	>0.50~12.50	≤275	≤145	10	—	—
				>12.50~50.00	≤275			9	—
			T62	>0.50~1.00	525	460	7	—	—
				>1.00~3.00	540	470	8	—	—
				>3.00~6.00	540	475	8	—	—
				>6.00~12.50	540	460	9	—	—
				>12.50~25.00	540	470	—	6	—
				>25.00~50.00	530	460	—	5	—
		T6	T6	>0.50~1.00	525	460	7	—	—
				>1.00~3.00	540	470	8	—	—
				>3.00~6.00	540	475	8	—	—
		F	—	>6.00~100.00	—	—	—	—	—
8A06	—	O	O	>0.20~0.30	≤110	—	16	—	—
				>0.30~0.50			21	—	—
				>0.50~0.80			26	—	—
				>0.80~10.00			30	—	—

(续)

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		弯心 半径 /mm
							$A_{50mm}$	A	
							≥		
8A06	—	H14 H24	H14 H24	>0.20~0.30	100	—	1	—	—
				>0.30~0.50			3	—	—
				>0.50~0.80			4	—	—
				>0.80~1.00			5	—	—
				>1.00~4.50			6	—	—
		H18	H18	>0.20~0.30	135	—	1	—	—
				>0.30~0.80			2	—	—
				>0.80~4.50			3	—	—
		H112	H112	>4.50~10.00	70	—	19	—	—
				>10.00~12.50	80		19	—	—
				>12.50~25.00	80		—	19	—
				>25.00~80.00	65		—	16	—
		F	—	>2.50~150.00	—	—	—	—	—
8011A	—	O H111	O H111	>0.20~0.50	80~130	30	19	—	—
				>0.50~1.50			21	—	—
				>1.50~3.00			24	—	—
		H14	H14	>0.20~0.50	125~165	110	2	—	—
				>0.50~3.00			3	—	—
		H24	H24	>0.20~0.50	125~165	100	3	—	—
				>0.50~1.50			4	—	—
				>1.50~3.00			5	—	—
		H18	H18	>0.20~0.50	165	145	1	—	—
				>0.50~3.00			2	—	—

注：1. 3105、3102 和 5182 的板、带材弯曲 180°，其他板、带材弯曲 90°。  
2.  $t$  为板或带材的厚度。  
3. F—自由加工状态；O—退火状态；H—加工硬化状态；T—不同于 F、O 或 H 的热处理状态。

## 17.1.2 印刷版基用铝板带的力学性能 (表 17-2)

表 17-2 印刷版基用铝板带的力学性能 (YS/T 421—2007)

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
		$\geq$	
1050、1052、 1060、1070	H18	150	1
	H16	130 ~ 170	2

## 17.1.3 百叶窗用铝合金带材的力学性能 (表 17-3)

表 17-3 百叶窗用铝合金带材的力学性能 (YS/T 621—2007)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%)$
5052	H19	0.130 ~ 0.180	$\geq 290$	$\geq 1$
		> 0.180 ~ 0.250	$\geq 285$	$\geq 1$
5182	H19	0.130 ~ 0.200	$\geq 360$	$\geq 1$
		> 0.200 ~ 0.250	$\geq 380$	$\geq 1$

## 17.1.4 易拉罐罐体用铝合金带材的力学性能 (表 17-4)

表 17-4 易拉罐罐体用铝合金带材的力学性能 (YS/T 435—2000)

合金 牌号	状态	厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
3104	H19	0.265 ~ 0.380	290	265	5

## 17.1.5 表盘及装饰用纯铝板的力学性能 (表 17-5)

表 17-5 表盘及装饰用纯铝板的力学性能 (YS/T 242—2009)

牌 号	状 态	厚度/mm	室温拉伸试验结果		
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
1035	O	0.30 ~ 0.50	75 ~ 110	—	15
		> 0.50 ~ 0.80	75 ~ 110	—	20
		> 0.80 ~ 1.30	75 ~ 110	—	25
		> 1.3 ~ 4.0	75 ~ 110	—	30

(续)

牌 号	状 态	厚度/mm	室温拉伸试验结果		
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
1035	H14 H24	0.30 ~ 0.50	120 ~ 145	—	2
		>0.50 ~ 0.80	120 ~ 145	—	3
		>0.80 ~ 1.30	120 ~ 145	—	4
		>1.30 ~ 4.00	120 ~ 145	—	5
	H18	0.30 ~ 0.50	155	—	1
		>0.50 ~ 0.80	155	—	2
		>0.80 ~ 1.30	155	—	3
		>1.30 ~ 2.00	155	—	4
1050A	O	0.30 ~ 0.50	65 ~ 95	20	20
		>0.50 ~ 1.50	65 ~ 95	20	22
		>1.50 ~ 3.00	65 ~ 95	20	26
		>3.00 ~ 4.00	65 ~ 95	20	29
	H14	0.30 ~ 0.50	105 ~ 145	85	2
		>0.50 ~ 1.50	105 ~ 145	85	3
		>1.50 ~ 3.00	105 ~ 145	85	4
		>3.00 ~ 4.00	105 ~ 145	85	5
	H24	0.30 ~ 0.50	105 ~ 145	75	3
		>0.50 ~ 1.50	105 ~ 145	75	4
		>1.50 ~ 3.00	105 ~ 145	75	5
		>3.00 ~ 4.00	105 ~ 145	75	8
	H18	0.30 ~ 0.50	140	120	1
		>0.50 ~ 1.50	140	120	2
		>1.50 ~ 2.00	140	120	2
1060	O	0.30 ~ 0.50	60 ~ 100	15	18
		>0.50 ~ 1.50	60 ~ 100	15	23
		>1.50 ~ 4.00	60 ~ 100	15	25
	H14 H24	0.30 ~ 0.50	95 ~ 135	70	2
		>0.50 ~ 0.80	95 ~ 135	70	2
		>0.80 ~ 1.50	95 ~ 135	70	4
		>1.50 ~ 4.00	95 ~ 135	70	6



(续)

牌 号	状 态	厚度/mm	室温拉伸试验结果		
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
1060	H18	0.30 ~ 0.50	125	85	2
		>0.50 ~ 1.50	125	85	3
		>1.50 ~ 2.00	125	85	4
1070A	O	0.30 ~ 0.50	60 ~ 90	15	23
		>0.50 ~ 1.50	60 ~ 90	15	25
		>1.50 ~ 3.00	60 ~ 90	15	29
		>3.00 ~ 4.00	60 ~ 90	15	32
	H14	0.30 ~ 0.50	100 ~ 140	70	4
		>0.50 ~ 1.50	100 ~ 140	70	4
		>1.50 ~ 3.00	100 ~ 140	70	5
		>3.00 ~ 4.00	100 ~ 140	70	6
	H24	0.30 ~ 0.50	100 ~ 140	60	5
		>0.50 ~ 1.50	100 ~ 140	60	6
		>1.50 ~ 3.00	100 ~ 140	60	7
		>3.00 ~ 4.00	100 ~ 140	60	9
	H18	0.30 ~ 0.50	125	105	2
		>0.50 ~ 1.50	125	105	2
		>1.50 ~ 2.00	125	105	2
1070	O	0.30 ~ 0.50	55 ~ 95	—	20
		>0.50 ~ 0.80	55 ~ 95	—	25
		>0.80 ~ 1.50	55 ~ 95	15	30
		>1.50 ~ 4.00	55 ~ 95	15	35
	H14 H24	0.30 ~ 0.50	85 ~ 120	—	2
		>0.50 ~ 0.80	85 ~ 120	—	3
		>0.80 ~ 1.50	85 ~ 120	65	4
		>1.50 ~ 3.00	85 ~ 120	65	5
		>3.00 ~ 4.00	85 ~ 120	65	6
	H18	0.30 ~ 0.50	120	—	1
		>0.50 ~ 0.80	120	—	2

(续)

牌 号	状 态	厚度/mm	室温拉伸试验结果		
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
1070	H18	> 0.80 ~ 1.50	120	—	3
		> 1.50 ~ 2.00	120	—	4
1100	O	0.30 ~ 0.50	75 ~ 105	25	17
		> 0.50 ~ 1.50	75 ~ 105	25	22
		> 1.50 ~ 4.00	75 ~ 105	25	30
	H14 H24	0.30 ~ 0.50	110 ~ 145	95	2
		> 0.50 ~ 1.50	110 ~ 145	95	3
		> 1.50 ~ 4.00	110 ~ 145	95	5
	H18	0.30 ~ 0.50	150	—	1
		> 0.50 ~ 1.50	150	—	2
		> 1.50 ~ 2.00	150	—	4
	1200	O	0.30 ~ 0.50	75 ~ 105	25
> 0.50 ~ 1.50			75 ~ 105	25	21
> 1.50 ~ 3.00			75 ~ 105	25	24
> 3.00 ~ 4.00			75 ~ 105	25	28
H14		0.30 ~ 0.50	115 ~ 155	95	2
		> 0.50 ~ 1.50	115 ~ 155	95	3
		> 1.50 ~ 3.00	115 ~ 155	95	4
		> 3.00 ~ 4.00	115 ~ 155	95	5
H24		0.30 ~ 0.50	115 ~ 155	90	3
		> 0.50 ~ 1.50	115 ~ 155	90	4
		> 1.50 ~ 3.00	115 ~ 155	90	5
		> 3.00 ~ 4.00	115 ~ 155	90	7
H18		0.30 ~ 0.50	150	130	1
		> 0.50 ~ 1.50	150	130	2
		> 1.50 ~ 2.00	150	130	2
3003	O	0.60	118 ~ 121	—	33 ~ 36
	H14	0.15	165	—	2.0
	H16	0.28	165	—	2.5

(续)

牌 号	状 态	厚度/mm	室温拉伸试验结果		
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
			$\geq$		
3003	H16	0.50	174	—	2.5
		0.80	164	—	3.0
	H18	0.30	245	—	2.0
5052	H22	0.20 ~ 1.00	215 ~ 265	130	6
	H32	0.20 ~ 1.00	215 ~ 265	130	6
	H24	0.50 ~ 1.00	230 ~ 280	150	5
8011	H14	0.35	143 ~ 150	—	3.2 ~ 4.0
	H18	0.35	171 ~ 184	—	2.8 ~ 3.5

17.1.6 钎焊用铝合金复合板的力学性能（表 17-6）

表 17-6 钎焊用铝合金复合板的力学性能（YS/T 69—2005）

复合板牌号	状 态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
Q121、Q111、Q131	O	0.50 ~ 1.30	$\leq 150$	18
		1.30 ~ 4.00		20
	H24	0.50 ~ 1.30	140	3
		1.30 ~ 4.00		5
Q515、Q525、Q535	O	0.50 ~ 1.30	$\leq 160$	14
		1.30 ~ 4.00		16
	H24	0.50 ~ 1.30	140	2
		1.30 ~ 4.00		4
Q616、Q626、Q636	O	0.50 ~ 1.30	$\leq 147$	18
		1.30 ~ 4.00		20
	H24	0.50 ~ 1.30	140	3
		1.30 ~ 4.00		5

## 17.1.7 瓶盖用铝合金板带材的力学性能 (表 17-7)

表 17-7 瓶盖用铝合金板带材的力学性能 (YS/T 91—2009)

牌号	状 态	厚度/mm	力 学 性 能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
1060	O	0.15 ~ 0.32	55 ~ 95	15
		>0.32 ~ 0.50	55 ~ 95	18
	H22	0.40 ~ 0.50	75 ~ 110	6
1100	H14、H24	0.20 ~ 0.32	110 ~ 145	1
		>0.32 ~ 0.50	110 ~ 145	2
	H16、H26	0.15 ~ 0.32	130 ~ 165	1
		>0.32 ~ 0.50	130 ~ 165	2
	H18	0.15 ~ 0.50	$\geq 150$	1
8011、 8011A	H14	0.15 ~ 0.50	125 ~ 165	2
	H24	0.15 ~ 0.20	125 ~ 165	2
		>0.20 ~ 0.50	125 ~ 165	3
	H16	0.15 ~ 0.50	130 ~ 165	1
	H26	0.15 ~ 0.20	130 ~ 165	1
		0.20 ~ 0.50	130 ~ 165	2
	H18	0.20 ~ 0.50	$\geq 165$	1
3003	H14	0.20 ~ 0.50	145 ~ 185	2
	H24	0.20 ~ 0.50	145 ~ 185	4
	H16	0.15 ~ 0.50	170 ~ 210	1
	H26	0.15 ~ 0.20	170 ~ 210	1
		>0.20 ~ 0.50	170 ~ 210	2
	H18	0.15 ~ 0.20	$\geq 185$	1
		0.20 ~ 0.50	$\geq 190$	1
3105	H14	0.20 ~ 0.50	150 ~ 200	2
	H24	0.20 ~ 0.50	150 ~ 200	4
	H16	0.20 ~ 0.50	175 ~ 225	1
	H26	0.20 ~ 0.50	175 ~ 225	3
	H18	0.20 ~ 0.50	$\geq 195$	1
5052	H18	0.20 ~ 0.50	280 ~ 320	3
	H19	0.20 ~ 0.50	$\geq 285$	2

17.1.8 铁道货车用铝合金板材的力学性能（表 17-8）

表 17-8 铁道货车用铝合金板材的力学性能（YS/T 622—2007）

牌号	状态	厚度 /mm	抗拉强度	非比例延伸强度	断后伸长率（%）	
			$R_m/(N/mm^2)$	$R_{p0.2}/(N/mm^2)$	$A_{50mm}$	A
			≥			
5083	H321	≤12. 50	305	215	12	—
		>12. 50			—	12
5383	H321	≤12. 50	305	220	12	—
		>12. 50			—	12

17.1.9 铝及铝合金花纹板的力学性能（表 17-9）

表 17-9 铝及铝合金花纹板的力学性能（GB/T 3618—2006）

花纹代号	牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}$ （%）	弯曲 系数
				$\geq$	$\geq$	
1号、9号	2A12	T4	$\geq 405$	255	10	—
2号、4号 6号、9号	2A11	H234、H194	$\geq 215$	—	3	—
4号、8号、 9号	3003	H114、H234	$\geq 120$	—	4	4
		H194	$\geq 140$	—	3	8
3号、4号、5号、 8号、9号	1×××	H114	$\geq 80$	—	4	2
		H194	$\geq 100$	—	3	6
3号、7号	5A02、 5052	O	$\leq 150$	—	14	3
2号、3号		H114	$\geq 180$	—	3	3
2号、4号、7号、 8号、9号		H194	$\geq 195$	—	3	8
3号	5A43	O	$\leq 100$	—	15	2
		H114	$\geq 120$	—	4	4
7号	6061	O	$\leq 150$	—	12	—

注：计算截面积所用的厚度为底板厚度。

17.1.10 铝及铝合金彩色涂层板带材的力学性能（表 17-10）

表 17-10 铝及铝合金彩色涂层板带材的力学性能（YS/T 431—2009）

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
			$\geq$			180°	90°
1050	H12	>0.2~0.3	80~120	—	2	—	0 $t$
		>0.3~0.5	80~120	—	3	—	0 $t$
		>0.5~0.8	80~120	—	4	—	0 $t$
		>0.8~1.5	80~120	65	6	—	0.5 $t$
		>1.5~1.8	80~120	65	8	—	0.5 $t$
	H22	>0.2~0.3	80~120	—	2	—	0 $t$
		>0.3~0.5	80~120	—	3	—	0 $t$
		>0.5~0.8	80~120	—	4	—	0 $t$
		>0.8~1.5	80~120	65	6	—	0.5 $t$
		>1.5~1.8	80~120	65	8	—	0.5 $t$
	H14	>0.2~0.3	95~130	—	1	—	0.5 $t$
		>0.3~0.5	95~130	—	2	—	0.5 $t$
		>0.5~0.8	95~130	—	3	—	0.5 $t$
		>0.8~1.5	95~130	75	4	—	1.0 $t$
		>1.5~1.8	95~130	75	5	—	1.0 $t$
	H24	>0.2~0.3	95~130	—	1	—	0.5 $t$
		>0.3~0.5	95~130	—	2	—	0.5 $t$
		>0.5~0.8	95~130	—	3	—	0.5 $t$
		>0.8~1.5	95~130	75	4	—	1.0 $t$
		>1.5~1.8	95~130	75	5	—	1.0 $t$
	H16	>0.2~0.5	120~150	—	1	—	2.0 $t$
		>0.5~0.8	120~150	85	2	—	2.0 $t$
		>0.8~1.5	120~150	85	3	—	2.0 $t$
		>1.5~1.8	120~150	85	4	—	2.0 $t$
	H26	>0.2~0.5	120~150	—	1	—	2.0 $t$
		>0.5~0.8	120~150	85	2	—	2.0 $t$
		>0.8~1.5	120~150	85	3	—	2.0 $t$

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
						180°	90°
			$\geq$				
1050	H26	>1.5~1.8	120~150	85	4	—	2.0 $t$
	H18	>0.2~0.5	130	—	1	—	—
		>0.5~0.8	130	—	2	—	—
		>0.8~1.5	130	—	3	—	—
		>1.5~1.8	130	—	4	—	—
1100	H12	>0.2~0.5	95~130	75	3	—	0 $t$
		>0.5~1.5	95~130	75	5	—	0 $t$
		>1.5~1.8	95~130	75	8	—	0 $t$
	H22	>0.2~0.5	95~130	75	3	—	0 $t$
		>0.5~1.5	95~130	75	5	—	0 $t$
		>1.5~1.8	95~130	75	8	—	0 $t$
	H14	>0.2~0.3	110~145	95	1	—	0 $t$
		>0.3~0.5	110~145	95	2	—	0 $t$
		>0.5~1.5	110~145	95	3	—	0 $t$
		>1.5~1.8	110~145	95	5	—	0 $t$
	H24	>0.2~0.3	110~145	95	1	—	0 $t$
		>0.3~0.5	110~145	95	2	—	0 $t$
		>0.5~1.5	110~145	95	3	—	0 $t$
		>1.5~1.8	110~145	95	5	—	0 $t$
	H16	>0.2~0.3	130~165	115	1	—	2 $t$
		>0.3~0.5	130~165	115	2	—	2 $t$
		>0.5~1.5	130~165	115	3	—	2 $t$
		>1.5~1.8	130~165	115	4	—	2 $t$
	H26	>0.2~0.3	130~165	115	1	—	2 $t$
		>0.3~0.5	130~165	115	2	—	2 $t$
		>0.5~1.5	130~165	115	3	—	2 $t$
		>1.5~1.8	130~165	115	4	—	2 $t$
	H18	>0.2~0.5	150	—	1	—	—
		>0.5~1.5	150	—	2	—	—
		>1.5~1.8	150	—	4	—	—



(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
			$\geq$			180°	90°
3003	H12	>0.2~0.5	120~160	90	3	1.5t	0t
		>0.5~1.5	120~160	90	4	1.5t	0.5t
		>1.5~1.8	120~160	90	5	1.5t	1.0t
	H22	>0.2~0.5	120~160	80	6	1.0t	0t
		>0.5~1.5	120~160	80	7	1.0t	0.5t
		>1.5~1.8	120~160	80	8	1.0t	1.0t
	H14	>0.2~0.5	145~185	125	2	2.0t	0.5t
		>0.5~1.5	145~185	125	2	2.0t	1.0t
		>1.5~1.8	145~185	125	3	2.0t	1.0t
	H24	>0.2~0.5	145~185	115	4	1.5t	0.5t
		>0.5~1.5	145~185	115	4	1.5t	1.0t
		>1.5~1.8	145~185	115	5	1.5t	1.0t
	H16	>0.2~0.5	170~210	150	1	2.5t	1.0t
		>0.5~1.5	170~210	150	2	2.5t	1.5t
		>1.5~1.8	170~210	150	2	2.5t	2.0t
	H26	>0.2~0.5	170~210	140	2	2.0t	1.0t
		>0.5~1.5	170~210	140	3	2.0t	1.5t
		>1.5~1.8	170~210	140	3	2.0t	2.0t
	H18	>0.2~0.5	190	170	1	—	1.5t
		>0.5~1.5	190	170	2	—	2.5t
		>1.5~1.8	190	170	2	—	3.0t
3004	H12	>0.2~0.5	190~240	155	2	1.5t	0t
		>0.5~1.5	190~240	155	3	1.5t	0.5t
		>1.5~1.8	190~240	155	4	2.0t	1.0t
	H22	>0.2~0.5	190~240	145	4	1.0t	0t
		>0.5~1.5	190~240	145	5	1.0t	0.5t
		>1.5~1.8	190~240	145	6	1.5t	1.0t
	H14	>0.2~0.5	220~265	180	1	2.5t	0.5t
		>0.5~1.5	220~265	180	2	2.5t	1.0t

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
						180°	90°
						$\geq$	
3004	H14	>1.5 ~ 1.8	220 ~ 265	180	2	2.5t	1.5t
	H24	>0.2 ~ 0.5	220 ~ 265	170	3	2.0t	0.5t
		>0.5 ~ 1.5	220 ~ 265	170	4	2.0t	1.0t
		>1.5 ~ 1.8	220 ~ 265	170	4	2.0t	1.5t
	H16	>0.2 ~ 0.5	240 ~ 285	200	1	3.5t	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	240 ~ 285	200	1	3.5t	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	240 ~ 285	200	2	—	2.5t
	H26	>0.2 ~ 0.5	240 ~ 285	190	3	3.0t	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	240 ~ 285	190	3	3.0t	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	240 ~ 285	190	3	—	2.5t
	H18	>0.2 ~ 0.5	260	230	1	—	1.5t
		>0.5 ~ 1.5	260	230	1	—	2.5t
		>1.5 ~ 1.8	260	230	2	—	—
3005	H12	>0.2 ~ 0.5	145 ~ 195	125	3	1.5t	0t
		>0.5 ~ 1.5	145 ~ 195	125	4	1.5t	0.5t
		>1.5 ~ 1.8	145 ~ 195	125	4	2.0t	1.0t
	H22	>0.2 ~ 0.5	145 ~ 195	110	5	1.0t	0t
		>0.5 ~ 1.5	145 ~ 195	110	5	1.0t	0.5t
		>1.5 ~ 1.8	145 ~ 195	110	6	1.5t	1.0t
	H14	>0.2 ~ 0.5	170 ~ 215	150	1	2.5t	0.5t
		>0.5 ~ 1.5	170 ~ 215	150	2	2.5t	1.0t
		>1.5 ~ 1.8	170 ~ 215	150	2	—	1.5t
	H24	>0.2 ~ 0.5	170 ~ 215	130	4	1.5t	0.5t
		>0.5 ~ 1.5	170 ~ 215	130	4	1.5t	1.0t
		>1.5 ~ 1.8	170 ~ 215	130	4	—	1.5t
	H16	>0.2 ~ 0.5	195 ~ 240	175	1	—	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	195 ~ 240	175	2	—	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	195 ~ 240	175	2	—	2.5t
	H26	>0.2 ~ 0.5	195 ~ 240	160	3	—	1.0t

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
			$\geq$				
3005	H26	>0.5~1.5	195~240	160	3	—	1.5 $t$
		>1.5~1.8	195~240	160	3	—	2.5 $t$
	H18	>0.2~0.5	220	200	1	—	1.5 $t$
		>0.5~1.5	220	200	2	—	2.5 $t$
		>1.5~1.8	220	200	2	—	—
3104	H12	>0.2~0.5	190~240	155	2	—	0 $t$
		>0.5~1.5	190~240	155	3	—	0.5 $t$
		>1.5~1.8	190~240	155	4	—	1.0 $t$
	H22	>0.2~0.5	190~240	145	4	—	0 $t$
		>0.5~1.5	190~240	145	5	—	0.5 $t$
		>1.5~1.8	190~240	145	6	—	1.0 $t$
	H14	>0.2~0.5	220~265	180	1	—	0 $t$
		>0.5~1.5	220~265	180	2	—	0.5 $t$
		>1.5~1.8	220~265	180	2	—	1.0 $t$
	H24	>0.2~0.5	220~265	170	3	—	0.5 $t$
		>0.5~1.5	220~265	170	4	—	1.0 $t$
		>1.5~1.8	220~265	170	4	—	1.5 $t$
	H16	>0.2~0.5	240~285	200	1	—	1.0 $t$
		>0.5~1.5	240~285	200	1	—	1.5 $t$
		>1.5~1.8	240~285	200	2	—	2.5 $t$
	H26	>0.2~0.5	240~285	190	3	—	1.0 $t$
		>0.5~1.5	240~285	190	3	—	1.5 $t$
		>1.5~1.8	240~285	190	3	—	2.5 $t$
	H18	>0.2~0.5	260	230	1	—	1.5 $t$
		>0.5~1.5	260	230	1	—	2.5 $t$
		>1.5~1.8	260	230	2	—	—
3105	H12	>0.2~0.5	130~180	105	3	1.5 $t$	—
		>0.5~1.5	130~180	105	4	1.5 $t$	—
		>1.5~1.8	130~180	105	4	1.5 $t$	—

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
			$\geq$			180°	90°
3105	H22	>0.2~0.5	130~180	105	6	—	—
		>0.5~1.5	130~180	105	6	—	—
		>1.5~1.8	130~180	105	7	—	—
	H14	>0.2~0.5	150~200	130	2	2.5 $t$	—
		>0.5~1.5	150~200	130	2	2.5 $t$	—
		>1.5~1.8	150~200	130	2	2.5 $t$	—
	H24	>0.2~0.5	150~200	120	4	2.5 $t$	—
		>0.5~1.5	150~200	120	4	2.5 $t$	—
		>1.5~1.8	150~200	120	5	2.5 $t$	—
	H16	>0.2~0.5	175~225	160	1	—	—
		>0.5~1.5	175~225	160	2	—	—
		>1.5~1.8	175~225	160	2	—	—
	H26	>0.2~0.5	175~225	150	3	—	—
		>0.5~1.5	175~225	150	3	—	—
		>1.5~1.8	175~225	150	3	—	—
	H18	>0.2~0.5	195	180	1	—	—
		>0.5~1.5	195	180	1	—	—
		>1.5~1.8	195	180	1	—	—
5005	H12	>0.2~0.5	125~165	95	2	1.0 $t$	0 $t$
		>0.5~1.5	125~165	95	2	1.0 $t$	0.5 $t$
		>1.5~1.8	125~165	95	4	1.5 $t$	1.0 $t$
	H22	>0.2~0.5	125~165	80	4	1.0 $t$	0 $t$
		>0.5~1.5	125~165	80	5	1.0 $t$	0.5 $t$
		>1.5~1.8	125~165	80	6	1.5 $t$	1.0 $t$
	H14	>0.2~0.5	145~185	120	2	2.0 $t$	0.5 $t$
		>0.5~1.5	145~185	120	2	2.0 $t$	1.0 $t$
		>1.5~1.8	145~185	120	3	2.5 $t$	1.0 $t$
	H24	>0.2~0.5	145~185	110	3	1.5 $t$	0.5 $t$
		>0.5~1.5	145~185	110	4	1.5 $t$	1.0 $t$

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
			$\geq$			180°	90°
5005	H24	>1.5 ~ 1.8	145 ~ 185	110	5	2.0t	1.0t
	H16	>0.2 ~ 0.5	165 ~ 205	145	1	—	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	165 ~ 205	145	2	—	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	165 ~ 205	145	3	—	2.0t
	H26	>0.2 ~ 0.5	165 ~ 205	135	2	—	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	165 ~ 205	135	3	—	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	165 ~ 205	135	4	—	2.0t
	H18	>0.2 ~ 0.5	185	165	1	—	1.5t
		>0.5 ~ 1.5	185	165	2	—	2.5t
		>1.5 ~ 1.8	185	165	2	—	3.0t
5050	H12	>0.2 ~ 0.5	155 ~ 195	130	2	—	0t
		>0.5 ~ 1.5	155 ~ 195	130	2	—	0.5t
		>1.5 ~ 1.6	155 ~ 195	130	4	—	1.0t
	H22	>0.2 ~ 0.5	155 ~ 195	110	4	1.0t	0t
		>0.5 ~ 1.5	155 ~ 195	110	5	1.0t	0.5t
		>1.5 ~ 1.8	155 ~ 195	110	7	1.5t	1.0t
	H14	>0.2 ~ 0.5	175 ~ 215	150	2	—	0.5t
		>0.5 ~ 1.5	175 ~ 215	150	2	—	1.0t
		>1.5 ~ 1.8	175 ~ 215	150	3	—	1.5t
	H24	>0.2 ~ 0.5	175 ~ 215	135	3	1.5t	0.5t
		>0.5 ~ 1.5	175 ~ 215	135	4	1.5t	1.0t
		>1.5 ~ 1.8	175 ~ 215	135	5	2.0t	1.5t
	H16	>0.2 ~ 0.5	195 ~ 235	170	1	—	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	195 ~ 235	170	2	—	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	195 ~ 235	170	2	—	2.5t
	H26	>0.2 ~ 0.5	195 ~ 235	160	2	—	1.0t
		>0.5 ~ 1.5	195 ~ 235	160	3	—	1.5t
		>1.5 ~ 1.8	195 ~ 235	160	4	—	2.5t
	H18	>0.2 ~ 0.5	220	190	1	—	1.5t
		>0.5 ~ 1.5	220	190	2	—	2.5t
		>1.5 ~ 1.8	220	190	2	—	—

(续)

牌号	状态	厚度 $t$ /mm	室温拉伸试验结果			弯曲性能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	弯曲半径	
						180°	90°
			$\geq$				
5052	H12	>0.2~0.5	210~260	160	4	—	—
		>0.5~1.5	210~260	160	5	—	—
		>1.5~1.8	210~260	160	6	—	—
	H22	>0.2~0.5	210~260	130	5	1.5 $t$	0.5 $t$
		>0.5~1.5	210~260	130	6	1.5 $t$	1.0 $t$
		>1.5~1.8	210~260	130	7	1.5 $t$	1.5 $t$
	H14	>0.2~0.5	230~280	180	3	—	—
		>0.5~1.5	230~280	180	3	—	—
		>1.5~1.8	230~280	180	4	—	—
	H24	>0.2~0.5	230~280	150	4	2.0 $t$	0.5 $t$
		>0.5~1.5	230~280	150	5	2.0 $t$	1.5 $t$
		>1.5~1.8	230~280	150	6	2.0 $t$	2.0 $t$
	H16	>0.2~0.5	250~300	210	2	—	—
		>0.5~1.5	250~300	210	3	—	—
		>1.5~1.8	250~300	210	3	—	—
	H26	>0.2~0.5	250~300	180	3	—	1.5 $t$
		>0.5~1.5	250~300	180	4	—	2.0 $t$
		>1.5~1.8	250~300	180	5	—	3.0 $t$
	H18	>0.2~0.5	270	240	1	—	—
		>0.5~1.5	270	240	2	—	—
		>1.5~1.8	270	240	2	—	—

17.1.11 铝及铝合金铸轧带材的力学性能（表 17-11）

表 17-11 铝及铝合金铸轧带材的力学性能（YS/T 90—2008）

牌 号	铸轧带边部厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
1070	5.0~10.0	60~115	30
1060	5.0~10.0	60~115	25
1050	5.0~10.0	65~120	25

(续)

牌 号	铸轧带边部厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
1145	5.0 ~ 10.0	70 ~ 120	25
1235	5.0 ~ 10.0	70 ~ 125	25
1100	5.0 ~ 10.0	90 ~ 150	25
3003	5.0 ~ 10.0	115 ~ 170	15
3004	5.0 ~ 10.0	155 ~ 230	10
3005	5.0 ~ 10.0	145 ~ 200	10
3102	5.0 ~ 10.0	80 ~ 130	20
3105	5.0 ~ 10.0	120 ~ 175	15
5005	5.0 ~ 10.0	120 ~ 175	15
5052	5.0 ~ 10.0	200 ~ 250	15
8006	5.0 ~ 10.0	130 ~ 200	20
8011A	5.0 ~ 10.0	90 ~ 150	20
8011	5.0 ~ 10.0	105 ~ 160	20
8079	5.0 ~ 10.0	100 ~ 155	15

17. 1. 12 铝幕墙板用板基的力学性能（表 17-12）

表 17-12 铝幕墙板用板基的力学性能（YS/T 429.1—2000）

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
				$\geq$	
1060	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 85$	65	8
	H24	> 2.0 ~ 4.0	85 ~ 120		10
1050	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 95$	75	6
	H24	> 2.0 ~ 4.0	95 ~ 125		8
1100	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 110$	95	5
	H24	> 2.0 ~ 4.0	110 ~ 145		6
8A06	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 100$	—	6
	H24	> 2.0 ~ 4.0	100 ~ 145		8
3003	O	1.5 ~ 4.0	95 ~ 130	35	25
	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 140$	115	5
	H24	> 2.0 ~ 4.0	120 ~ 170		8
3004	O	1.5 ~ 4.0	150 ~ 200	60	18



(续)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
				$\geq$	
5005	O	1.5 ~ 4.0	105 ~ 145	35	21
	H14	1.5 ~ 2.0	$\geq 140$	115	5
	H24	>2.0 ~ 4.0	120 ~ 180		6
5052	O	1.5 ~ 4.0	170 ~ 215	65	19

17.2 铝及铝合金箔材的力学性能

17.2.1 半刚性容器用铝及铝合金箔的力学性能（表 17-13）

表 17-13 半刚性容器用铝及铝合金箔的力学性能（GB/T 22649—2008）

牌 号	状 态	基材厚度/mm	拉伸试验结果	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
1050 1100 1200	O	0.030 ~ 0.050	60 ~ 95	6
		>0.050 ~ 0.100	60 ~ 95	10
		>0.100 ~ 0.150	65 ~ 100	12
	H24/H44	0.030 ~ 0.050	100 ~ 135	4
		>0.050 ~ 0.100	100 ~ 140	8
		>0.100 ~ 0.150	100 ~ 140	10
3003	O	0.030 ~ 0.050	95 ~ 130	12
		>0.050 ~ 0.100	95 ~ 130	14
		>0.100 ~ 0.150	95 ~ 130	16
		>0.150 ~ 0.200	95 ~ 130	20
	H22/H42	0.030 ~ 0.050	125 ~ 160	10
		>0.050 ~ 0.100	125 ~ 160	12
		>0.100 ~ 0.150	130 ~ 160	14
		>0.150 ~ 0.200	130 ~ 160	18
	H24/H44	0.030 ~ 0.050	135 ~ 170	8
		>0.050 ~ 0.070	135 ~ 170	10
		>0.070 ~ 0.100	135 ~ 170	12

(续)

牌 号	状 态	基材厚度/mm	拉伸试验结果	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
3003	H24/H44	>0.100 ~ 0.150	135 ~ 170	15
		>0.150 ~ 0.200	135 ~ 170	18
	H26/H46	0.030 ~ 0.050	155 ~ 185	6
		>0.050 ~ 0.070	155 ~ 185	7
		>0.070 ~ 0.100	155 ~ 185	9
		>0.100 ~ 0.150	155 ~ 185	12
		>0.150 ~ 0.200	155 ~ 185	15
	H19	0.050 ~ 0.100	220 ~ 300	3
3004	O	0.030 ~ 0.050	165 ~ 195	8
		>0.050 ~ 0.060	165 ~ 195	10
		>0.060 ~ 0.080	165 ~ 195	12
8011 8011A	O	0.030 ~ 0.050	90 ~ 115	10
		>0.050 ~ 0.100	90 ~ 115	14
		>0.100 ~ 0.150	90 ~ 115	16
		>0.150 ~ 0.200	90 ~ 115	18
	H22	0.030 ~ 0.050	105 ~ 130	6
		>0.050 ~ 0.100	105 ~ 130	10
		>0.100 ~ 0.150	105 ~ 130	12
		>0.150 ~ 0.200	105 ~ 130	14
	H24	0.030 ~ 0.050	125 ~ 145	5
		>0.050 ~ 0.100	125 ~ 145	8
		>0.100 ~ 0.150	125 ~ 145	10
		>0.150 ~ 0.200	125 ~ 145	12
8006	O	0.030 ~ 0.050	95 ~ 140	8
		>0.050 ~ 0.200	95 ~ 140	10
	H22/H42	0.030 ~ 0.050	115 ~ 150	7
		>0.050 ~ 0.200	115 ~ 150	9

17.2.2 泡罩包装用铝及铝合金箔的力学性能（表 17-14）

表 17-14 泡罩包装用铝及铝合金箔的力学性能 (GB/T 22645—2008)

牌 号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%) \geq$
1235	O	0.018 ~ 0.025	40 ~ 100	1
		>0.025 ~ 0.040	50 ~ 110	4
		>0.040 ~ 0.100	55 ~ 110	8
1100、1200、1235	H18	0.018 ~ 0.100	$\geq 135$	—
1100、1200	O	0.018 ~ 0.025	40 ~ 100	1
		>0.025 ~ 0.040	50 ~ 110	3
		>0.040 ~ 0.100	55 ~ 110	6
3003	O	0.018 ~ 0.025	80 ~ 130	1
		>0.025 ~ 0.040	80 ~ 130	4
		>0.040 ~ 0.100	80 ~ 130	8
8006	O	0.018 ~ 0.025	80 ~ 140	1
		>0.025 ~ 0.040	85 ~ 140	2
		>0.040 ~ 0.100	90 ~ 145	6
	H18	0.018 ~ 0.100	$\geq 180$	1
8011、8011A、8079	O	0.018 ~ 0.025	55 ~ 105	1
		>0.025 ~ 0.040	60 ~ 110	4
		>0.040 ~ 0.100	60 ~ 120	8
	H18	0.018 ~ 0.100	$\geq 150$	1

## 17.2.3 空调器散热片用素铝箔的力学性能 (表 17-15)

表 17-15 空调器散热片用素铝箔的力学性能 (YS/T 95.1—2009)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
1050	O	0.08 ~ 0.10	70 ~ 100	$\geq 40$	$\geq 10$
		>0.10 ~ 0.20	70 ~ 100	$\geq 40$	$\geq 15$
	H18	0.08 ~ 0.20	$\geq 135$	—	$\geq 1$
1100 1200	O	0.08 ~ 0.10	80 ~ 110	$\geq 50$	$\geq 18$
		>0.10 ~ 0.20	80 ~ 110	$\geq 50$	$\geq 20$
	H22	0.08 ~ 0.10	100 ~ 130	$\geq 60$	$\geq 18$
		>0.10 ~ 0.20	100 ~ 130	$\geq 60$	$\geq 20$
	H24	0.08 ~ 0.10	115 ~ 145	$\geq 70$	$\geq 15$
		>0.10 ~ 0.20	115 ~ 145	$\geq 70$	$\geq 18$

(续)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{P0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$
1100 1200	H26	0.08 ~ 0.10	130 ~ 160	$\geq 90$	$\geq 8$
		>0.10 ~ 0.20	130 ~ 160	$\geq 90$	$\geq 10$
	H18	0.08 ~ 0.20	$\geq 160$	—	$\geq 1$
3102	H24	0.08 ~ 0.10	120 ~ 145	$\geq 90$	$\geq 10$
		>0.10 ~ 0.20	120 ~ 145	$\geq 100$	$\geq 12$
	H26	0.08 ~ 0.10	125 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 8$
		>0.10 ~ 0.20	125 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 10$
8006	O	0.08 ~ 0.10	110 ~ 140	$\geq 50$	$\geq 15$
		>0.10 ~ 0.20	110 ~ 140	$\geq 50$	$\geq 20$
	H22	0.08 ~ 0.10	120 ~ 150	$\geq 60$	$\geq 15$
		>0.10 ~ 0.20	120 ~ 150	$\geq 60$	$\geq 20$
	H24	0.08 ~ 0.10	125 ~ 155	$\geq 80$	$\geq 15$
		>0.10 ~ 0.20	125 ~ 155	$\geq 80$	$\geq 18$
	H26	0.08 ~ 0.10	130 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 10$
		>0.10 ~ 0.20	130 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 12$
8001	O	0.08 ~ 0.10	80 ~ 110	$\geq 50$	$\geq 20$
		>0.10 ~ 0.20	80 ~ 110	$\geq 50$	$\geq 20$
	H22	0.08 ~ 0.10	100 ~ 130	$\geq 60$	$\geq 18$
		>0.10 ~ 0.20	100 ~ 130	$\geq 60$	$\geq 20$
	H24	0.08 ~ 0.10	120 ~ 145	$\geq 80$	$\geq 15$
		>0.10 ~ 0.20	120 ~ 145	$\geq 80$	$\geq 18$
	H26	0.08 ~ 0.10	130 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 8$
		>0.10 ~ 0.20	130 ~ 160	$\geq 100$	$\geq 10$
	H18	0.08 ~ 0.20	$\geq 160$	—	$\geq 1$

17.2.4 啤酒标用铝合金箔的力学性能（表 17-16）

表 17-16 啤酒标用铝合金箔的力学性能（GB/T 22646—2008）

牌 号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%) \geq$
8011、8011A、8079	O	0.0090 ~ 0.0105	80 ~ 110	2.5
		0.0106 ~ 0.0120	85 ~ 115	3.0
8006		0.0090 ~ 0.0120	90 ~ 135	2.5

## 17.2.5 铝及铝合金箔的力学性能 (表 17-17)

表 17-17 铝及铝合金箔的力学性能 (GB/T 3198—2003)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
1100 1200	O	0.006 ~ 0.009	40 ~ 105	0.5
		0.010 ~ 0.024	40 ~ 105	1
		0.025 ~ 0.040	50 ~ 105	3
		0.041 ~ 0.089	55 ~ 105	6
		0.090 ~ 0.139	60 ~ 115	10
		0.140 ~ 0.200	60 ~ 115	14
	H22	0.006 ~ 0.009	—	—
		0.010 ~ 0.024	—	—
		0.025 ~ 0.040	90 ~ 135	2
		0.041 ~ 0.089	90 ~ 135	3
		0.090 ~ 0.139	90 ~ 135	4
		0.140 ~ 0.200	90 ~ 135	6
	H24	0.006 ~ 0.009	—	—
		0.010 ~ 0.024	—	—
		0.025 ~ 0.040	110 ~ 160	2
		0.041 ~ 0.089	110 ~ 160	3
		0.090 ~ 0.139	110 ~ 160	4
		0.140 ~ 0.200	110 ~ 160	5
	H26	0.006 ~ 0.009	—	—
		0.010 ~ 0.024	—	—
		0.025 ~ 0.040	125 ~ 180	1
		0.041 ~ 0.089	125 ~ 180	1
		0.090 ~ 0.139	125 ~ 180	2
		0.140 ~ 0.200	125 ~ 180	2
	H18	0.006 ~ 0.200	$\geq 140$	—
	H19	0.006 ~ 0.200	$\geq 150$	—
其他 1 × × × 系	O	0.006 ~ 0.009	35 ~ 100	0.5
		0.010 ~ 0.024	40 ~ 100	1
		0.025 ~ 0.040	45 ~ 100	2
		0.041 ~ 0.089	45 ~ 100	4

(续)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
其他 1×××系	O	0.090 ~ 0.139	50 ~ 100	6
		0.140 ~ 0.200	50 ~ 100	10
	H18	0.006 ~ 0.200	$\geq 135$	—
2A11	O	0.030 ~ 0.049	$\leq 195$	1.5
		0.050 ~ 0.200	$\leq 195$	3
	H18	0.030 ~ 0.049	$\geq 205$	—
		0.050 ~ 0.200	$\geq 215$	—
2024 2A12	O	0.030 ~ 0.049	$\leq 195$	1.5
		0.050 ~ 0.200	$\leq 205$	3.0
	H18	0.030 ~ 0.049	$\geq 225$	—
		0.050 ~ 0.200	$\geq 245$	—
3003	O	0.030 ~ 0.099	100 ~ 140	10
		0.100 ~ 0.200	100 ~ 140	15
	H14/24	0.050 ~ 0.200	140 ~ 170	1
	H16/26	0.100 ~ 0.200	$\geq 180$	—
	H18	0.020 ~ 0.200	$\geq 185$	—
5A02	O	0.030 ~ 0.049	$\leq 195$	—
		0.050 ~ 0.200	$\leq 195$	4
	H16/26	0.100 ~ 0.200	$\geq 255$	—
	H18	0.020 ~ 0.200	$\geq 265$	—
5052	O	0.030 ~ 0.200	175 ~ 225	4
	H14/24	0.050 ~ 0.200	250 ~ 300	—
	H16/26	0.100 ~ 0.200	$\geq 270$	—
	H18	0.050 ~ 0.200	$\geq 275$	—
8011 8011A 8079	O	0.006 ~ 0.009	45 ~ 100	0.5
		0.010 ~ 0.024	50 ~ 105	1
		0.025 ~ 0.040	55 ~ 110	4
		0.041 ~ 0.089	60 ~ 110	8
		0.090 ~ 0.139	60 ~ 110	13
		0.140 ~ 0.200	60 ~ 110	16
	H22	0.035 ~ 0.040	90 ~ 150	2
		0.041 ~ 0.089	90 ~ 150	4

(续)

牌号	状态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
8011 8011A 8079	H22	0.090 ~ 0.139	90 ~ 150	5
		0.140 ~ 0.200	90 ~ 150	6
	H24	0.035 ~ 0.040	120 ~ 170	2
		0.041 ~ 0.089	120 ~ 170	3
		0.090 ~ 0.139	120 ~ 170	4
		0.140 ~ 0.200	120 ~ 170	5
	H26	0.035 ~ 0.040	140 ~ 190	1
		0.041 ~ 0.089	140 ~ 190	1
		0.090 ~ 0.139	140 ~ 190	2
		0.140 ~ 0.200	140 ~ 190	2
	H18	0.035 ~ 0.200	$\geq 160$	—
	H19	0.035 ~ 0.200	$\geq 170$	—
8006	O	0.006 ~ 0.009	80 ~ 135	1
		0.010 ~ 0.024	85 ~ 140	2
		0.025 ~ 0.040	85 ~ 140	6
		0.041 ~ 0.089	90 ~ 140	10
		0.090 ~ 0.139	90 ~ 140	15
		0.140 ~ 0.200	90 ~ 140	15
	H18	0.006 ~ 0.200	$\geq 170$	—

17.2.6 电缆用铝箔的力学性能（表 17-18）

表 17-18 电缆用铝箔的力学性能（GB/T 3198—2003）

牌 号	状 态	厚度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
1145、1235、1060、 1050A、1200、1100	O	0.100 ~ 0.150	60 ~ 95	15
		>0.150 ~ 0.200	70 ~ 110	20
8011	O	>0.150 ~ 0.200	80 ~ 110	23



17.3 铝及铝合金管材的力学性能

17.3.1 SB211 壳体用 919 铝合金厚壁挤压管的力学性能（表 17-19）

表 17-19 SB211 壳体用 919 铝合金厚壁挤压管的力学性能（CB 1191—1988）

状态	取样方向	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
WT <sub>62</sub>	纵向	353.0	402.0	9.0
	长横向	353.0	402.0	7.0
WT <sub>72</sub>	纵向	333.0	392.0	9.0
	长横向	314.0	382.0	7.0
AT <sub>62</sub>	纵向	343.0	392.0	9.0
	长横向	343.0	392.0	7.0
AT <sub>72</sub>	纵向	323.0	382.0	9.0
	长横向	314.0	382.0	6.0

17.3.2 铝及铝合金连续挤压管的力学性能（表 17-20）

表 17-20 铝及铝合金连续挤压管的力学性能（GB/T 20250—2006）

牌 号	室温纵向拉伸试验结果		硬度 HV
	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%)$	
	$\geq$		
1070、1070A、1060、1050	60	27	20
1100	75	28	25
3003	95	25	30

17.3.3 铝及铝合金拉（轧）制无缝管材的力学性能（表 17-21）

表 17-21 铝及铝合金拉（轧）制无缝管材的力学性能（GB/T 6893—2000）

牌号	状态	壁厚/mm	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率			
					全截面试样 $A_{50mm}(\%)$	其他试样		
						$A_{50mm}(\%)$	$A_{50mm}(\%)$	$A(\%)$
1035 1050A 1050	O  H14	所有  所有	60 ~ 95  $\geq 95$	—  —	—  —			

(续)

牌号	状态	壁厚/mm		抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率		
						全截面试样	其他试样	
						$A_{50mm}(\%)$	$A_{50mm}(\%)$	$A(\%)$
						$\geq$		
1060	O	所有		60 ~ 95	—	—		
1070A								
1070	H14	所有		$\geq 85$	—	—		
1100	O	所有		75 ~ 110	—	—		
1200	H14	所有		$\geq 110$	—	—		
2A11	O	所有		$\leq 245$	—	10		
	T4	外径 $\leq 22$	$\leq 1.5$	$\geq 375$	$\geq 195$	13		
			$> 1.5 \sim 2.0$			14		
			$> 2.0 \sim 5.0$			—		
		外径 $> 22 \sim 50$	$\leq 1.5$	$\geq 390$	$\geq 225$	12		
			$> 1.5 \sim 5.0$			13		
		$> 50$	所有			11		
2017	O	所有		$\leq 245$	$\leq 125$	17	16	16
	T4	所有		375	$\geq 215$	13	12	12
2A12	O	所有		$\leq 245$	—	10		
	T4	外径 $\leq 22$	$\leq 2.0$	$\geq 410$	$\geq 255$	13		
			$> 2.0 \sim 5.0$			—		
		外径 $> 22 \sim 50$	所有	$\geq 420$	$\geq 275$	12		
		$> 50$	所有	$\geq 420$	$\geq 275$	10		
2024	O	所有		$\leq 220$	$\leq 100$	—		
	T4	0.63 ~ 1.2		$\geq 440$	$\geq 290$	12	10	—
		$> 1.2 \sim 5.0$		$\geq 440$	$\geq 290$	14	10	—
3003	O	0.63 ~ 1.2		95 ~ 130	—	30	20	—
		$> 1.2 \sim 5.0$		95 ~ 130	—	35	25	—
	H14	0.63 ~ 1.2		$\geq 140$	$\geq 115$	5	3	—
		$> 1.2 \sim 5.0$		$\geq 140$	$\geq 115$	8	4	—

(续)

牌号	状态	壁厚/mm	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率		
					全截面试样	其他试样	
					$A_{50mm}(\%)$	$A_{50mm}(\%)$	$A(\%)$
					$\geq$		
3A21	O	所有	$\leq 135$	—	—		
	H14	所有	$\geq 135$	—	—		
5A02	O	所有	$\leq 225$	—	—		
	H14	外径 $\leq 55$ , 壁厚 $\leq 2.5$	$\geq 225$	—	—		
		其他所有	$\geq 195$	—	—		
5A03	O	所有	$\geq 175$	$\geq 80$	15		
	H34	所有	$\geq 215$	$\geq 125$	8		
5A05	O	所有	$\geq 215$	$\geq 90$	15		
	H32	所有	$\geq 245$	$\geq 145$	8		
5A06	O	所有	$\geq 315$	$\geq 145$	15		
5052	O	所有	170 ~ 240	$\geq 70$	—		
	H14	所有	$\geq 235$	$\geq 180$	—		
5056	O	所有	$\leq 315$	$\geq 100$	—		
	H32	所有	$\geq 305$	—	—		
5083	O	所有	270 ~ 355	$\geq 110$	14	12	12
	H32	所有	$\geq 315$	$\geq 235$	5	5	5
6A02	O	所有	$\leq 155$	—	14		
	T4	所有	$\geq 205$	—	14		
	T6	所有	$\geq 305$	—	8		
6061	O	所有	$\leq 150$	$\leq 95$	15	15	13
	T4	0.63 ~ 1.20	$\geq 205$	$\geq 100$	16	14	—
		> 1.20 ~ 5.0	$\geq 205$	$\geq 110$	18	16	—
	T6	0.63 ~ 1.20	$\geq 290$	$\geq 240$	10	8	—
		> 1.20 ~ 5.0	$\geq 290$	$\geq 240$	12	10	—
6063	O	所有	$\leq 130$	—	—		
	T6	0.63 ~ 1.20	$\geq 230$	$\geq 195$	12	8	—
		> 1.2 ~ 5.0	$\geq 230$	$\geq 195$	14	10	—
8A06	O	所有	$\leq 120$	—	20		
	H14	所有	$\geq 100$	—	5		

17.3.4 铝及铝合金热挤压无缝圆管的力学性能（表 17-22）

表 17-22 铝及铝合金热挤压无缝圆管的力学性能（GB/T 4437.1—2000）

合金牌号	供应状态	试样状态	壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率	
						$A_{50mm}$ (%)	$A$ (%)
						≥	
1070A、1060	O	O	所有	60~95	—	25	22
	H112	H112	所有	≥60	—	25	22
1050A、1035	O	O	所有	60~100	—	25	23
1100、1200	O	O	所有	75~105	—	25	22
	H112	H112	所有	≥75	—	25	22
2A11	O	O	所有	≤245	—	—	10
	H112	H112	所有	≥350	≥195	—	10
2017	O	O	所有	≤245	≤125	—	16
	H112、T4	T4	所有	≥345	≥215	—	12
2A12	O	O	所有	≤245	—	—	10
	H112、T4	T4	所有	≥390	≥255	—	10
2017	O	O	所有	≤245	≤130	12	10
	H112	T4	≤18	≥395	≥260	12	10
			>18	≥395	≥260	—	9
3A21	H112	H112	所有	≤165	—	—	—
3003	O	O	所有	95~130	—	25	22
	H112	H112	所有	≥95	—	25	22
5A02	H112	H112	所有	≤225	—	—	—
5052	O	O	所有	170~240	≥70	—	—
5A03	H112	H112	所有	≥175	≥70	—	15
5A05	H112	H112	所有	≥225	≥110	—	15
5A06	O、H112	O、H112	所有	≥315	≥145	—	15
5083	O	O	所有	270~350	≥110	14	12
	H112	H112	所有	≥270	≥110	12	20
5454	O	O	所有	215~285	≥85	14	12
	H112	H112	所有	≥215	≥85	12	10
5086	O	O	所有	240~315	≥95	14	12
	H112	H112	所有	≥240	≥95	12	10

(续)

合金牌号	供应状态	试样状态	壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率	
						$A_{50mm}$ (%)	$A$ (%)
						≥	
6A02	O	O	所有	≤145	—	—	17
	T4	T4	所有	≥205	—	—	14
	H112、T6	T6	所有	≥295	—	—	8
6061	T4	T4	所有	≥180	≥110	16	14
	T6	T6	≤6.3	≥260	≥240	8	—
			>6.3	≥260	≥240	10	9
6063	T4	T4	≤12.5	≥130	≥70	14	12
			>12.5 ~ 25	≥125	≥60	—	12
	T6	T6	所有	≥205	≥170	10	9
7A04、7A09	H112、T6	T6	所有	≥530	≥400	—	5
7075	H112、T6	T6	≤6.3	≥540	≥485	7	—
			>6.3 ≤12.5	≥560	≥505	7	6
			>12.5	≥560	≥495	—	6
7A15	H112、T6	T6	所有	≥470	≥420	—	6
8A06	H112	H112	所有	≤120	—	—	20

17.3.5 铝及铝合金热挤压有缝管材的室温纵向力学性能（表 17-23）

表 17-23 铝及铝合金热挤压有缝管材的室温纵向力学性能（GB/T 4437.2—2003）

牌号	供应状态	试样状态	壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率	
						$A_{50mm}$ (%)	$A$ (%)
						≥	
1070A、1060	O	O	所有	60 ~ 95	—	25	22
	H112	H112	所有	60	—	25	22
1050A、1035	O	O	所有	60 ~ 100	—	25	23
	H112	H112	所有	60	—	25	23
1100、1200	O	O	所有	75 ~ 105	—	25	22
	H112	H112	所有	75	—	25	22
2A11	O	O	所有	≤245	—	—	10
	H112、T4	T4	所有	350	195	—	10

(续)

牌号	供应状态	试样状态	壁厚 /mm	抗拉强度	规定非比例延伸	断后伸长率	
				$R_m$	强度 $R_{p0.2}$	$A_{50mm}$ (%)	$A$ (%)
				/(N/mm <sup>2</sup> )	/(N/mm <sup>2</sup> )		
≥							
2017	O	O	所有	≤245	≤125	—	16
	H112、T4	T4	所有	345	215	—	12
2A12	O	O	所有	≤245	—	—	10
	H112、T4	T4	所有	390	255	—	10
2024	O	O	所有	≤245	≤130	12	10
	H112、T4	T4	≤18	395	260	12	10
			>18	395	260	—	9
3003	O	O	所有	95 ~ 130	—	25	22
	H112	H112	所有	95	—	25	22
5A02	H112	H112	所有	≤225	—	—	—
5052	O	O	所有	170 ~ 240	70	—	—
5A03	H112	H112	所有	175	70	—	15
5A05	H112	H112	所有	225	—	—	15
5A06	O、H112	O、H112	所有	315	145	—	15
5083	O	O	所有	270 ~ 350	110	14	12
	H112	H112	所有	270	110	12	10
5454	O	O	所有	215 ~ 285	85	14	12
	H112	H112	所有	215	85	12	10
5086	O	O	所有	240 ~ 315	95	14	12
	H112	H112	所有	240	95	12	10
6A02	O	O	所有	≤145	—	—	17
	T4	T4	所有	205	—	—	14
	H112、T6	T6	所有	295	—	—	8
6005A	T5	T5	≤6.30	260	215	7	—
			>6.30	260	215	9	8
6005	T5	T5	≤3.20	260	240	8	—
			>3.21 ~ 25.00	260	240	10	9
6061	T4	T4	所有	180	110	16	14
	T6	T6	≤6.30	265	245	8	—
			>6.30	265	245	10	9

(续)

牌号	供应状态	试样状态	壁厚 /mm	抗拉强度	规定非比例延伸	断后伸长率	
				$R_m$	强度 $R_{p0.2}$	$A_{50mm}$ (%)	A (%)
				/(N/mm <sup>2</sup> )	/(N/mm <sup>2</sup> )		
				≥			
6063	T4	T4	≤12.50	130	70	14	12
			>12.50 ~ 25.00	125	60	—	12
	T6	T6	所有	205	180	10	8
	T5	T5	所有	160	110	—	8
6063A	T5	T5	≤10.00	200	160	—	5
			>10.00	190	150	—	5
	T6	T6	≤10.00	230	190	—	5
			>10.00	220	180	—	4

17.3.6 凿岩机用铝合金管的力学性能（表 17-24）

表 17-24 凿岩机用铝合金管的力学性能（YS/T 97—1997）

合金牌号	状 态	抗拉强度 $R_m / (\text{N/mm}^2)$	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2} / (\text{N/mm}^2)$	断后伸长率 $A_{11.3} (\%)$
		$\geq$		
2A11	T4	375	225	11
2A12		410	265	10

17.4 铝及铝合金棒材的力学性能

17.4.1 一般工业用铝及铝合金棒材的室温纵向力学性能（表 17-25）

表 17-25 一般工业用铝及铝合金棒材的室温纵向力学性能（YS/T 624—2007）

牌号	状态	直径或厚度 /mm	抗拉强度 $R_m$	规定非比例延伸强度	断后伸长率 (%)	
			/(N/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	A	$A_{50mm}$
			≥			
1060	O	≤100	55	15	22	25
	H18	≤10	110	90	—	—
	F	≤100	—	—	—	—
1100	O	≤30	75 ~ 105	20	22	25
	H18	≤10	150	—	—	—
	F	≤100	—	—	—	—



(续)

牌号	状态	直径或厚度 /mm	抗拉强度 $R_m$	规定非比例延伸强度	断后伸长率(%)	
			$/(N/mm^2)$	$R_{p0.2}/(N/mm^2)$	A	$A_{50mm}$
			$\geq$			
2014	O	$\leq 100$	$\leq 240$	—	10	12
	T4、T351	$\leq 100$	380	220	12	16
	T6、T651	$\leq 100$	450	380	7	8
	F	$\leq 100$	—	—	—	—
2024	O	$\leq 100$	$\leq 240$	—	14	16
	T4	$\leq 12.5$	425	310	—	10
	T4、T351	$> 12.5 \sim 100$	425	290	9	—
	F	$\leq 100$	—	—	—	—
3003	O	$\leq 50$	95 ~ 130	35	22	25
	H14	$\leq 10$	140	—	—	—
	H18	$\leq 10$	185	—	—	—
	F	$\leq 100$	—	—	—	—
5052	O	$\leq 50$	170 ~ 220	65	22	25
	H14	$\leq 30$	235	180	5	—
	H18	$\leq 10$	265	220	2	—
	F	$\leq 100$	—	—	—	—
6061	T6	$\leq 100$	290	240	9	10
	F	$\leq 100$	—	—	—	—
7075	O	$\leq 100$	$\leq 275$	—	9	10
	T6、T651	$\leq 100$	530	455	6	7
	F	$\leq 100$	—	—	—	—

17.4.2 铝及铝合金挤压扁棒的力学性能（表 17-26）

表 17-26 铝及铝合金挤压扁棒的力学性能（YS/T 439—2001）

合金	供应 状态	试样 状态	厚度 /mm	截面积 /cm <sup>2</sup>	抗拉强度	规定非比例延伸强度	断后伸长率
					$R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)
					≥		
1070A 1070	H112	H112	≤120	≤200	55	15	—
1060	H112	H112	≤120	≤200	60	15	22

(续)

合金	供应 状态	试样 状态	厚度 /mm	截面积 /cm <sup>2</sup>	抗拉强度 $R_m / (N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2} / (N/mm^2)$	断后伸长率 $A (\%)$
					$\geq$		
1050A 1050	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 200$	65	20	—
1035	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 200$	70	20	—
1100 1200	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 200$	75	20	—
2A11	H112、T4	T4	$\leq 120$	$\leq 170$	370	215	12
2A12	H112、T4	T4	$\leq 120$	$\leq 170$	390	255	12
2A50	H112、T6	T6	$\leq 120$	$\leq 170$	355	—	12
2A70 2A80 2A90	H112、T6	T6	$\leq 120$	$\leq 170$	355	—	8
2A14	H112、T6	T6	$\leq 120$	$\leq 170$	430	—	8
2017	T4	T4	$\leq 120$	$\leq 200$	345	215	12
2024	T4	T4	$\leq 6$	$\leq 12$	390	295	12
			$> 6 \sim 19$	$\leq 76$	410	305	12
			$> 19 \sim 38$	$\leq 130$	450	315	10
3A21	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	$\leq 165$	—	20
3003	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	90	30	22
5052	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	175	70	—
5A02	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	$\leq 225$	—	10
5A03	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	175	80	13
5A05	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	265	120	15
5A06	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	315	155	15
5A12	H112	H112	$\leq 120$	$\leq 170$	370	185	15
6A02	H112、T6	T6	$\leq 120$	$\leq 170$	295	—	12
6061	H112、T6	T6	$\leq 120$	$\leq 170$	260	240	9
6063	H112、T6	T6	$\leq 25$	$\leq 100$	205	170	9
6101	T6	T6	$\leq 12.5$	$\leq 38$	200	172	—
7A04 7A09	H112、T6	T6	$\leq 22$	$\leq 100$	490	370	7
			$> 22 \sim 120$	$\leq 200$	530	400	6
7075	H112、T6	T6	$\leq 6.3$	$\leq 12$	540	485	6
			$> 6.3 \sim 12.5$	$\leq 30$	560	505	6
			$> 12.5 \sim 50$	$\leq 130$	560	495	6
8A06	H112	H112	$\leq 150$	$\leq 200$	70	—	10

## 17.4.3 铝及铝合金挤压棒的力学性能 (表 17-27)

表 17-27 铝及铝合金挤压棒的力学性能 (GB/T 3191—1998)

牌 号	供应 状态	试样 状态	棒材直径/mm (方棒、六角棒内 切圆直径)	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
				$\geq$		
1060	O	O	$\leq 150$	60 ~ 95	15	22
	H112	H112		60	15	22
1070A	H112	H112		55	15	—
1050A				65	20	—
1200				75	20	—
1035、8A06	O、H112	O、H112		$\leq 120$	—	25
3003	O	O		95 ~ 130	35	22
	H112	H112		90	30	22
3A21	O	O		$\leq 165$	—	20
5A02				$\leq 225$	—	10
5A03				175	80	13
5A05				265	120	15
5A06				315	155	15
5A12				370	185	15
5052	H112	H112		175	70	—
	O	O		175 ~ 245	70	20
2A11	H112	T42	$\leq 150$	370	215	12
2A12			$\leq 22$	390	255	12
2A13		T4	$> 22 \sim 150$	420	275	10
			$\leq 22$	315	—	4
2A02	H112	T62	$> 22 \sim 150$	345	—	4
2A16			$\leq 150$	430	275	10
2A06			355	235	8	
			$\leq 22$	430	285	10
			$> 22 \sim 100$	440	295	9
6A02		T6	$> 100 \sim 150$	430	285	10
2A50			$\leq 150$	295	—	12
2A70、2A80 2A90				355	—	12
2A14				355	—	8
6061			H112、T6	T62、T6	$\leq 22$	440
	T4	T4	$> 22 \sim 150$	450	—	10
6063	T6	T6	$\leq 150$	260	240	9
			$\leq 25$	180	110	14
	T5	T5	$\leq 25$	205	170	9
			$\leq 12.5$	150	110	7
7A04、7A09	H112 T6	T62 T6	$> 12.5 \sim 25.0$	145	105	7
			$\leq 22$	490	370	7
			$> 22 \sim 150$	530	400	6

17.4.4 高强度铝合金挤压棒的力学性能（表 17-28）

表 17-28 高强度铝合金挤压棒的力学性能（GB/T 3191—1998）

牌 号	供应 状态	试样 状态	棒材直径 (方棒、六角棒内 切圆直径) /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
				$\geq$		
2A11	H112、T4	T42、T4	20 ~ 120	390	245	8
2A12			20 ~ 120	440	305	8
6A02	H112、T6	T62、T6	20 ~ 120	305	—	8
2A50			20 ~ 120	380	—	10
2A14			20 ~ 120	460	—	8
7A04、7A09			20 ~ 100	550	450	6
			> 100 ~ 120	530	430	6

17.4.5 煤矿支柱用铝合金棒材的力学性能（表 17-29）

表 17-29 煤矿支柱用铝合金棒材的力学性能（YS/T 589—2006）

牌号	供货状态	试样状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
			$\geq$		
7A15	H112	T62	490	420	6
	T6	T6			

17.4.6 电工圆铝杆的力学性能（表 17-30）

表 17-30 电工圆铝杆的力学性能（GB/T 3954—2008）

材料牌号	型号	状态	抗拉强度/( $N/mm^2$ )	断后伸长率 ( $\%) \geq$
1B97、1B95 1B93、1B90	B	O	35 ~ 65	35
	B2	H14	60 ~ 90	15
1A60	A	O	60 ~ 90	25
	A2	H12	80 ~ 110	13
	A4	H13	95 ~ 115	11
	A6	H14	110 ~ 130	8
	A8	H16	120 ~ 150	6
1R50	RE-A	O	60 ~ 90	25
	RE-A2	H12	80 ~ 110	13
	RE-A4	H13	95 ~ 115	11
	RE-A6	H14	110 ~ 130	8
	RE-A8	H16	120 ~ 150	6
6101	C <sup>①</sup>	T4	150 ~ 200	10
6201	D <sup>①</sup>	T4	160 ~ 220	10

① 自然时效 7d 以上检测。

17.5 铝及铝合金线材和丝材的力学性能

17.5.1 半导体器件键合用铝丝的力学性能（表 17-31）

表 17-31 半导体器件键合用铝丝的力学性能（YS/T 641—2007）

线径 / $\mu\text{m}$	断后伸长率（%）		拉伸最大力/ $10^{-2}\text{N}$					
			Al-R/Al-R CR			Al-H11/Al-H11 CR		
	最小值	波动范围	最小值	最大值	波动范围	最小值	最大值	波动范围
100 $\pm$ 4	0.5	3	90	130	30	—	—	—
125 $\pm$ 5	1	4	—	—	—	50	90	30
125 $\pm$ 5	5	4	80	120	30	—	—	—
150 $\pm$ 5	1	6	—	—	—	80	120	30
150 $\pm$ 5	5	6	130	170	30	—	—	—
175 $\pm$ 6	1	6	—	—	—	100	160	40
175 $\pm$ 6	10	6	170	230	40	—	—	—
200 $\pm$ 6	1	8	—	—	—	150	230	60
200 $\pm$ 6	10	8	230	330	80	—	—	—
250 $\pm$ 6	5	8	—	—	—	200	300	80
250 $\pm$ 6	10	8	320	480	100	—	—	—
300 $\pm$ 6	5	10	—	—	—	280	400	100
300 $\pm$ 6	10	10	450	650	150	—	—	—
375 $\pm$ 7	5	10	—	—	—	450	650	150
375 $\pm$ 7	10	10	700	900	150	—	—	—
400 $\pm$ 7	5	10	—	—	—	500	700	150
400 $\pm$ 7	10	10	800	1000	150	—	—	—
450 $\pm$ 8	5	10	—	—	—	650	850	150
450 $\pm$ 8	10	10	1150	1450	200	—	—	—
500 $\pm$ 8	5	10	—	—	—	850	1100	180
500 $\pm$ 8	10	10	1400	1800	300	—	—	—

17.5.2 电工用铝及铝合金扁线的力学性能（表 17-32）

表 17-32 电工用铝及铝合金扁线的力学性能（GB/T 5584.3—2009）

型号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	型号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
LBR	60.0 ~ 95.0	20	LBY4	95.0 ~ 140	4
LBY2	75.0 ~ 115	6	LBY8	$\geq 130$	3

17.5.3 电工圆铝线的力学性能（表 17-33）

表 17-33 电工圆铝线的力学性能（GB/T 3955—2009）

型 号	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
LR	0.30 ~ 1.00	$\leq 98$	15
	1.01 ~ 10.00	$\leq 98$	20
LY4	0.30 ~ 6.00	95 ~ 125	—
LY6	0.30 ~ 6.00	125 ~ 165	—
	6.01 ~ 10.00	125 ~ 165	3
LY8	0.30 ~ 5.00	160 ~ 205	—
LY9	$\leq 1.25$	$\geq 200$	—
	1.26 ~ 1.50	$\geq 195$	—
	1.51 ~ 1.75	$\geq 190$	—
	1.76 ~ 2.00	$\geq 185$	—
	2.01 ~ 2.25	$\geq 180$	—
	2.26 ~ 2.50	$\geq 175$	—
	2.51 ~ 3.00	$\geq 170$	—
	3.01 ~ 3.50	$\geq 165$	—
	3.51 ~ 5.00	$\geq 160$	—

17.5.4 电缆屏蔽用铝镁合金线的力学性能（表 17-34）

表 17-34 电缆屏蔽用铝镁合金线的力学性能（GB/T 23309—2009）

型号状态	公称直径 ·/mm	拉断力/N ≥	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 A (%) ≥
LHP-Y	0.10	2.36	300	4
	0.11	2.85		
	0.12	3.39		
	0.13	3.98		
	0.14	4.62		
	0.15	5.48		
	0.16	6.23	310	
	0.18	7.89		
	0.20	9.74		
	0.22	11.78		
	0.24	14.02		
	0.26	16.46		
LHP-R	0.10	1.73	220	7
	0.11	2.09		
	0.12	2.49		
	0.13	2.92		
	0.14	3.39		
	0.15	3.89		

(续)

型号状态	公称直径 /mm	拉断力/N ≥	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 A (%) ≥
LHP-R	0.16	4.62	230	7
	0.18	5.85		
	0.20	7.23		
	0.22	8.74		
	0.24	10.40		
	0.26	12.21		

17.5.5 铝及铝合金拉制圆线材的力学性能（表 17-35）

表 17-35 铝及铝合金拉制圆线材的力学性能（GB/T 3195—2008）

牌 号	状 态	直径/mm	力 学 性 能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{200mm} (%)$
1A50	0	0.8 ~ 1.0	$\geq 75$	$\geq 10$
		$>1.0 \sim 1.5$		$\geq 12$
		$>1.5 \sim 2.0$		
		$>2.0 \sim 3.0$		$\geq 15$
		$>3.0 \sim 4.0$		$\geq 18$
		$>4.0 \sim 4.5$		
		$>4.5 \sim 5.0$		
	H19	0.8 ~ 1.0	$\geq 160$	$\geq 1.0$
		$>1.0 \sim 1.5$	$\geq 155$	$\geq 1.2$
		$>1.5 \sim 2.0$		$\geq 1.5$
		$>2.0 \sim 3.0$		
		$>3.0 \sim 4.0$	$\geq 135$	
		$>4.0 \sim 4.5$		
		$>4.5 \sim 5.0$		
1350	0	9.5 ~ 12.7	60 ~ 100	—
	H12、H22	9.5 ~ 12.7	80 ~ 120	—
	H14、H24		100 ~ 140	
	H16、H26		115 ~ 155	
	H19	1.2 ~ 2.0	$\geq 160$	$\geq 1.2$
		$>2.0 \sim 2.5$	$\geq 175$	$\geq 1.5$
		$>2.5 \sim 3.5$	$\geq 160$	
		$>3.5 \sim 5.3$	$\geq 160$	$\geq 1.8$
		$>5.3 \sim 6.5$	$\geq 155$	$\geq 2.2$



(续)

牌 号	状 态	直径/mm	力 学 性 能	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{200mm}(\%)$
1100	O	1.6 ~ 25.0	$\leq 110$	—
	H14		110 ~ 145	—
3003	O		$\leq 130$	—
	H14		140 ~ 180	—
5052	O	1.6 ~ 25.0	$\leq 220$	—
5056	O		$\leq 320$	—
6061	O		$\leq 155$	—

注：1350 线材允许焊接，但 O 状态线材接头处抗拉强度不小于  $60N/mm^2$ ，其他状态线材接头处抗拉强度不小于  $75N/mm^2$ 。

17.5.6 铝钛合金线的力学性能（表 17-36）

表 17-36 铝钛合金线的力学性能（YS/T 570—2006）

牌号	制造方法	供应状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%)$
LTi2.5	拉制	硬 (Y)	$> 150$	—

17.6 铝及铝合金锻件的力学性能

17.6.1 SB211 壳体用 919 铝合金模锻件的力学性能（表 17-37）

表 17-37 SB211 壳体用 919 铝合金模锻件的力学性能（CB 1192—1988）

状态	取样方向	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
WT	顺纤维	353.0	402.0	8.0
	横纤维	343.0	402.0	5.0
WT	顺纤维	323.0	382.0	8.0
	横纤维	314.0	382.0	5.0
AT	顺纤维	343.0	392.0	8.0
	横纤维	343.0	392.0	5.0
AT	顺纤维	314.0	382.0	8.0
	横纤维	314.0	382.0	5.0

17.6.2 一般工业用铝及铝合金模锻件的力学性能 (表 17-38)

表 17-38 一般工业用铝及铝合金模锻件的力学性能 (YS/T 479—2005)

牌号	供应 状态	厚度 /mm	顺流线试样的拉伸性能			非流线试样的拉伸性能			硬度 HBW		
			抗拉强 度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 (%)		抗拉强 度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ / ( $N/mm^2$ )		断后伸长率 (%)	
					$A_{50mm}$	A				$A_{50mm}$	A
≥											
1100	H112	≤100	75	30	18	16	—	—	—	20	
2014	T4	≤100	380	205	11	9	—	—	—	100	
	T6	≤25	450	385	6	5	440	380	3	125	
		>25 ~ 50	450	385	6	5	440	380	2	125	
		>50 ~ 80	450	380	6	5	435	370	2	125	
		>80 ~ 100	435	380	6	5	435	370	2	125	
2025	T6	≤100	360	230	11	9	—	—	—	100	
2219	T6	≤100	400	260	8	7	385	250	4	100	
3003	H112	≤100	95	35	18	16	—	—	—	25	
4032	T6	≤100	360	290	3	2	—	—	—	115	
5083	0	≤80	270	110	16	14	270	110	12	—	
	H111	≤100	290	150	14	12	270	140	12	—	
	H112	≤100	275	125	16	14	270	110	14	—	
6061	T6	≤100	260	240	7	6	260	240	5	80	
6066	T6	≤100	345	310	8	7	—	—	—	100	
6151	T6	≤100	305	255	10	9	305	255	6	90	
7049	T73	≤25	495	425	7	6	490	420	3	135	
		>25 ~ 50	495	425	7	6	485	415	3	135	

(续)

牌号	供应 状态	厚度 /mm	顺流线试样的拉伸性能				非流线试样的拉伸性能				硬度 HBW
			抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		抗拉强 度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸 强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)		
					$A_{50mm}$	A			$A_{50mm}$	A	
≥											
7049	T73	> 50 ~ 80	490	420	7	6	485	415	3	2	135
		> 80 ~ 100	490	420	7	6	485	415	2	1	135
		> 100 ~ 130	485	415	7	6	470	400	2	1	135
7050	T74	≤ 50	495	425	7	6	470	385	5	4	135
		> 50 ~ 100	490	420	7	6	460	380	4	3	135
		> 100 ~ 130	485	415	7	6	455	370	3	2	135
	T6	> 130 ~ 150	485	405	7	6	455	370	3	3	135
		≤ 25	515	440	7	6	490	420	3	2	135
		> 25 ~ 50	510	435	7	6	490	420	3	2	135
7075	T6	> 50 ~ 80	510	435	7	6	485	415	3	2	135
		> 80 ~ 100	505	435	7	6	485	415	2	1	135
		≤ 80	455	385	7	6	425	365	3	2	125
	T73	> 80 ~ 100	440	380	7	6	420	360	2	1	125
		≤ 80	455	385	7	6	425	350	3	2	125
		> 80 ~ 100	440	365	7	6	420	340	2	1	125
7175	T74	≤ 80	525	455	7	6	490	425	4	3	—
		≤ 80	505	435	7	6	470	380	4	3	—
		≤ 80	515	450	7	6	485	420	4	3	—

## 17.7 铝及铝合金铸件的力学性能

### 17.7.1 冶金设备铝合金铸件的力学性能 (表 17-39)

表 17-39 冶金设备铝合金铸件的力学性能 (YB/T 036.6—1992)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A$ $(\%) \geq$	硬度 HBW $\geq$
1	ZAlSi7Mg	ZL101	SJ	F	153	2	50
			SJ	T2	133	2	45
			JB	T4	182	4	50
			S	T4	173	4	50
			JJB	T5	202	2	60
			S	T5	192	2	60
			SB	T5	192	2	60
			SB	T6	222	1	70
			SB	T7	192	2	60
2	ZAlSi12	ZL102	SB、JB	F	143	4	50
			J	F	153	2	50
			SB、JB	T2	133	4	50
			J	T2	143	3	50
3	ZAlSi9Mg	ZL104	S、J	F	143	2	50
			J	T1	192	1.5	70
			SB	T6	222	2	70
			J、JB	T6	231	2	70
4	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S、J	T1	153	0.5	65
			S	T5	212	1	70
			J	T5	231	0.5	70
			S	T6	222	0.5	70
			S、J	T7	173	1	65
5	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	J	F	202	1.5	80
			SB	T6	251	1.5	90
			JB	T6	310	2	100
6	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	S	T4	222	4	70

(续)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A$ $(\%) \geq$	硬度 HBW $\geq$
6	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	J	T4	271	6	80
			S	T5	271	3.5	90
			J	T5	310	5	100
7	ZAlCu10	ZL202	S、J	F	104	—	50
			S、J	T6	163	—	100
8	ZAlCu4	ZL203	S	T4	192	6	60
			J	T4	202	6	60
			S	T5	212	3	70
			J	T5	222	3	70
9	ZAlZn11Si7	ZL401	S	T1	192	2	80
			J	T1	241	1.5	90

注：B—变质处理；F—铸态；T1—人工时效；T2—退火；T4—固溶处理加自然时效；T5—固溶处理加不完全人工时效；T6—固溶处理加完全人工时效；T7—固溶处理加稳定化处理。

17.7.2 烟草机械用铝合金铸件的力学性能（表 17-40）

表 17-40 烟草机械用铝合金铸件的力学性能（YC/T 10.8—2006）

合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A$ $(\%) \geq$	硬度 HBW $\geq$
ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	155	2	50
		S、R、J、L	T2	135	2	45
		JB	T4	185	4	50
		S、R、K	T4	175	4	50
		J、JB	T5	205	2	60
		S、R、K	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T6	225	1	70
		SB、RB、KB	T7	195	2	60
		SB、RB、KB	T8	155	3	55
ZAlSi7MgA	ZL101A	S、R、K	T4	195	5	70
		J、JB	T4	225	5	70
		S、R、K	T5	235	4	80

(续)

合 金 牌 号	合金 代号	铸 造 方 法	合金 状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$	硬度 HBW $\geq$
ZAlSi7MgA	ZL101A	SB、RB、KB	T5	235	4	80
		J、JB	T5	265	4	80
		SB、RB、KB	T6	275	2	90
		J、JB	T8	295	3	90
ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	145	4	50
		J	F	155	2	50
		SB、JB、RB、KB	T2	135	4	50
		J	T2	145	3	50
ZAlSi9Mg	ZL104	S、J、R、K	F	145	2	50
		J	T1	195	1.5	65
		SB、RB、KB	T6	225	2	70
		J、JB	T6	235	2	70
ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	165	2	65
		SB	T6	245	2	90
		J	F	195	2	70
		J	T6	275	2.5	100
ZAlCu5Mn	ZL201	S、J、R、K	T4	290	8	70
		S、J、R、K	T5	330	4	90
		S	T7	310	2	80
ZAlZn11Si7	ZL401	S、R、K	T1	192	2	80
		J	T1	241	1.5	90

注：1. 铸造方法代号：S—砂型铸造；J—金属型铸造；K—壳型铸造；R—熔模铸造；B—变质处理。  
2. 合金状态代号：F—铸态；T1—人工时效；T2—退火；T4—淬火；T5—淬火和部分时效；T6—淬火和完全时效；T7—淬火和稳定回火；T8—淬火和软化回火。

17.7.3 铸造铝合金的力学性能（表 17-41）

表 17-41 铸造铝合金的力学性能（GB/T 1173—1995）

序 号	合 金 牌 号	合金 代号	铸 造 方 法	合金 状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$	硬度 HBW 5/250/30 $\geq$
1	ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	155	2	50
			S、R、J、K	T2	135	2	45

(续)

序号	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	硬度 HBW 5/250/30 ≥
1	ZAlSi7Mg	ZL101	JB	T4	185	4	50
			S、R、K	T4	175	4	50
			J、JB	T5	205	2	60
			S、R、K	T5	195	2	60
			SB、RB、KB	T5	195	2	60
			SB、RB、KB	T6	225	1	70
			SB、RB、KB	T7	195	2	60
			SB、RB、KB	T8	155	3	55
2	ZAlSi7MgA	ZL101A	S、R、K	T4	195	5	60
			J、JB	T4	225	5	60
			S、R、K	T5	235	4	70
			SB、RB、KB	T5	235	4	70
			JB、J	T5	265	4	70
			SB、RB、KB	T6	275	2	80
			JB、J	T6	295	3	80
3	ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	145	4	50
			J	F	155	2	50
			SB、JB、RB、KB	T2	135	4	50
			J	T2	145	3	50
4	ZAlSi9Mg	ZL104	S、J、R、K	F	145	2	50
			J	T1	195	1.5	65
			SB、RB、KB	T6	225	2	70
			J、JB	T6	235	2	70
5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S、J、R、K	T1	155	0.5	65
			S、R、K	T5	195	1	70
			J	T5	235	0.5	70
			S、R、K	T6	225	0.5	70
			S、J、R、K	T7	175	1	65
6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	SB、R、K	T5	275	1	80
			J、JB	T5	295	2	80
7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	SB	F	175	1	70
			JB	T1	195	1.5	70
			SB	T5	235	2	60
			JB	T5	255	2	70
			SB	T6	245	1	80
			JB	T6	265	2	70
			SB	T7	225	2	60
			J	T7	245	2	60
8	ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	165	2	65
			SB	T6	245	2	90



(续)

序号	合 金 牌 号	合金 代号	铸 造 方 法	合金 状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$	硬度 HBW 5/250/30 $\geq$
8	ZAlSi7Cu4	ZL107	J	F	195	2	70
			J	T6	275	2.5	100
9	ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	J	T1	195	—	85
			J	T6	255	—	90
10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	J	T1	195	0.5	90
			J	T6	245	—	100
11	ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	S	F	125	—	80
			J	F	155	—	80
			S	T1	145	—	80
			J	T1	165	—	90
12	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	J	F	205	1.5	80
			SB	T6	255	1.5	90
			J、JB	T6	315	2	100
13	ZAlSi7Mg1A	ZL114A	SB	T5	290	2	85
			J、JB	T5	310	3	90
14	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	S	T4	225	4	70
			J	T4	275	6	80
			S	T5	275	3.5	90
			J	T5	315	5	100
15	ZAlSi8MgBe	ZL116	S	T4	255	4	70
			J	T4	275	6	80
			S	T5	295	2	85
			J	T5	335	4	90
16	ZAlCu5Mn	ZL201	S、J、R、K	T4	295	8	70
			S、J、R、K	T5	335	4	90
			S	T7	315	2	80
17	ZAlCu5MnA	ZL201A	S、J、R、K	T5	390	8	100
18	ZAlCu4	ZL203	S、R、K	T4	195	6	60
			J	T4	205	6	60
			S、R、K	T5	215	3	70
			J	T5	225	3	70
19	ZAlCu5MnCdA	ZL204A	S	T5	440	4	100
20	ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	S	T5	440	7	100
			S	T6	470	3	120
			S	T7	460	2	110
21	ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	S	T1	165	—	75
			J	T1	175	—	75
22	ZAlMg10	ZL301	S、J、R	T4	280	10	60
23	ZAlMg5Si1	ZL303	S、J、R、K	F	145	1	55
24	ZAlMg8Zn1	ZL305	S	T4	290	8	90

(续)

序号	合 金 牌 号	合金 代号	铸 造 方 法	合金 状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	硬度 HBW 5/250/30 ≥
25	ZAlZn11Si7	ZL401	S、R、K	T1	195	2	80
			J	T1	245	1.5	90
26	ZAlZn6Mg	ZL402	J	T1	235	4	70
			S	T1	215	4	65

注：1. 铸造方法代号：S—砂型铸造；J—金属型铸造；R—熔模铸造；K—壳型铸造；B—变质处理。  
2. 合金状态代号：F—铸态；T1—人工时效；T2—退火；T4—固溶处理加自然时效；T5—固溶处理加不完全人工时效；T6—固溶处理加完全人工时效；T7—固溶处理加稳定化处理；T8—固溶处理加软化处理。

17.8 铝及铝合金导体的力学性能（表 17-42）

表 17-42 铝及铝合金导体的力学性能（YS/T 454—2003）

牌号	状态	板厚或壁厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
			≥		
1060	H112	10.00 ~ 25.00	60	25	15
		> 25.00 ~ 40.00	55	20	20
1R35		10.00 ~ 25.00	65	25	15
		> 25.00 ~ 40.00	60	20	20
1350		10.00 ~ 25.00	70	25	—
		> 25.00 ~ 40.00	60	20	—
3003	H16	3.00 ~ 6.00	165	145	4
		> 6.00 ~ 15.00			—
6101	T6、T6511	3.00 ~ 15.00	200	170	8
	T10		175	155	—
6063	T6、T6511	3.00 ~ 15.00	205	175	8
	T10		180	160	—
6R05	T6、T6511	3.00 ~ 15.00	210	180	8
	T10		185	165	—

第 18 章 镁及镁合金的力学性能

18.1 镁及镁合金板材的力学性能（表 18-1）

表 18-1 镁及镁合金板材的室温力学性能（GB/T 5154—2003）

牌号	供应 状态	板材厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例强度 /( $N/mm^2$ )		断后伸长率 (%)	
				延伸 $R_{p0.2}$	压缩 $R_{pc0.2}$	A	$A_{50mm}$
				$\geq$			
M2M	O	0.80 ~ 3.00	190	110	—	—	6.0
		>3.00 ~ 5.00	180	100	—	—	5.0
		>5.00 ~ 10.00	170	90	—	—	5.0
	H112	10.00 ~ 12.50	200	90	—	—	4.0
		>12.50 ~ 20.00	190	100	—	4.0	—
		>20.00 ~ 32.00	180	110	—	4.0	—
AZ40M	O	0.80 ~ 3.00	240	130	—	—	12.0
		>3.00 ~ 10.00	230	120	—	—	12.0
	H112	10.00 ~ 12.50	230	140	—	—	10.0
		>12.50 ~ 20.00	230	140	—	8.0	—
		>20.00 ~ 32.00	230	140	70	8.0	—
AZ41M	H18	0.50 ~ 0.80	290	—	—	—	2.0
	O	0.50 ~ 3.00	250	150	—	—	12.0
		>3.00 ~ 5.00	240	140	—	—	12.0
		>5.00 ~ 10.00	240	140	—	—	10.0
	H112	10.00 ~ 12.50	240	140	—	—	10.0
		>12.50 ~ 20.00	250	150	—	6.0	—
		>20.00 ~ 32.00	250	140	80	10.0	—
ME20M	H18	0.50 ~ 0.80	260	—	—	—	2.0
	H24	0.80 ~ 3.00	250	160	—	—	8.0
		>3.00 ~ 5.00	240	140	—	—	7.0
		>5.00 ~ 10.00	240	140	—	—	6.0

(续)

牌号	供应 状态	板材厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例强度 /( $N/mm^2$ )		断后伸长率 (%)	
				延伸 $R_{p0.2}$	压缩 $R_{pc0.2}$	A	$A_{50mm}$
			$\geq$				
ME20M	O	0.50 ~ 3.00	230	120	—	—	12.0
		>3.0 ~ 5.0	220	110	—	—	10.0
		>5.0 ~ 10.0	220	110	—	—	10.0
	H112	10.0 ~ 12.5	220	110	—	—	10.0
		>12.5 ~ 20.0	210	110	—	10.0	—
		>20.0 ~ 32.0	210	110	70	7.0	—
		>32.0 ~ 70.0	200	90	50	6.0	—

18.2 镁合金热挤压管材的力学性能（表 18-2）

表 18-2 镁合金热挤压管材的力学性能（YS/T 495—2005）

牌号	状态	管材壁厚/mm	抗拉强度 $R_m$ /( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 A (%)
			$\geq$		
AZ31B	H112	0.70 ~ 6.30	220	140	8
		>6.30 ~ 20.00	220	140	4
AZ61A	H112	0.70 ~ 20.00	250	110	7
M2S	H112	0.70 ~ 20.00	195	—	2
ZK61S	H112	0.70 ~ 20.00	275	195	5
	T5	0.70 ~ 6.30	315	260	4
		2.50 ~ 30.00	305	230	4

注：壁厚 <1.60mm 的管材不要求规定非比例延伸强度。

18.3 镁合金棒材的力学性能

18.3.1 镁合金挤压棒的力学性能（表 18-3）

表 18-3 镁合金挤压棒的力学性能（GB/T 5155—2003）

牌号	状态	棒材直径 /mm	抗拉强度 $R_m$ /( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 A (%)
			$\geq$		
AZ40M	H112	$\leq 100.00$	245	—	6.0
		>100.00 ~ 130.00	245	—	5.0

(续)

牌号	状态	棒材直径 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
			$\geq$		
ME20M	H112	$\leq 50.00$	215	—	4.0
		$> 50.00 \sim 100.00$	205	—	3.0
		$> 100.00 \sim 130.00$	195	—	2.0
ZK61M	T5	$\leq 100.00$	315	245	6.0
		$> 100.00 \sim 130.00$	305	235	6.0

18.3.2 镁合金热挤制矩形棒的力学性能（表 18-4）

表 18-4 镁合金热挤制矩形棒的力学性能（YS/T 588—2006）

牌号	供应状态	公称厚度/ mm	横截面积/ mm <sup>2</sup>	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
				$\geq$		
AZ31B	H112	$\leq 6.30$	所有	240	145	7
AZ61A	H112	$\leq 6.30$	所有	260	145	8
AZ80A	H112	$\leq 6.30$	所有	295	195	9
	T5	$\leq 6.30$	所有	325	205	4
M1A	H112	$\leq 6.30$	所有	205	—	2
ZK40A	T5	所有	$\leq 3200$	275	255	4
ZK60A	H112	所有	$\leq 3200$	295	215	5
	T5	所有	$\leq 3200$	310	250	4

18.4 镁合金热挤压型材的力学性能（表 18-5）

表 18-5 镁合金热挤压型材的力学性能（GB/T 5156—2003）

牌号	状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸长率 $A$ (%) $\geq$
ME20M	H112	225	—	10.0
ZK61M	T5	310	245	7.0
AZ40M	H112	240	—	5.0

18.5 镁及镁合金铸件的力学性能

18.5.1 镁合金铸件的力学性能（表 18-6）

表 18-6 镁合金铸件的力学性能（GB/T 19078—2003）

铸造工艺	牌号	状态代号	拉伸试验结果			硬度 HBW
			抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸 长率 $A$ (%)	
			$\geq$			
砂型铸造 (S)	AZ81A、AZ81S	F	160	90	2	50 ~ 65
		T4	240	90	8	50 ~ 65
	AZ91D	F	160	90	2	55 ~ 65
		T4	240	110	6	55 ~ 70
		T6	240	150	2	60 ~ 90
	AZ63A	F	180	80	4	—
		T4	235	80	7	—
		T5	180	85	2	—
		T6	235	110	3	—
	AM100A	T6	240	120	—	—
	ZC63A	T6	195	125	2	55 ~ 65
	ZK51A	T5	235	140	5	—
	ZK61A	T6	275	180	5	—
	K1A	F	165	40	14	—
	ZE41A	T5	200	135	2.5	55 ~ 70
	EZ33A	T5	140	95	2.5	50 ~ 60
	QE22A、QE22S	T6	240	175	2	70 ~ 90
	EQ21A、EQ21S	T6	240	175	2	70 ~ 90
WE54A	T6	250	170	2	80 ~ 90	
WE43A	T6	220	170	2	75 ~ 90	
永久模铸 造 (K)	AZ81A	F	160	90	2	50 ~ 65
		T4	240	90	8	50 ~ 65
	AZ91D	F	160	110	2	55 ~ 70
		T4	240	120	6	55 ~ 70
		T6	240	150	2	60 ~ 90
	AM100A	F	140	70	—	—
		T4	235	70	6	—
		T6	235	105	2	—
	ZC63A	T6	195	125	2	55 ~ 65
	ZE41A	T5	210	135	3	55 ~ 70
	EZ33A	T5	145	100	3	50 ~ 60
	QE22A	T6	240	175	3	70 ~ 90

(续)

铸造工艺	牌号	状态代号	拉伸试验结果			硬度 HBW
			抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸 长率 $A$ (%)	
			$\geq$			
永久模铸 造 (K)	EQ21A	T6	240	175	2	70 ~ 90
	WE54A	T6	250	170	2	80 ~ 90
	WE43A	T6	220	170	2	75 ~ 90
模压铸造 (D)	AZ81A	F	200 ~ 250	140 ~ 160	1 ~ 7	60 ~ 85
	AZ91D	F	200 ~ 260	140 ~ 170	1 ~ 6	65 ~ 85
	AM20S	F	150 ~ 220	80 ~ 100	8 ~ 18	40 ~ 55
	AM50A	F	180 ~ 230	110 ~ 130	5 ~ 15	50 ~ 65
	AM60B	F	190 ~ 250	120 ~ 150	4 ~ 14	55 ~ 70
	AS21S	F	170 ~ 230	110 ~ 130	4 ~ 14	50 ~ 70
	AS41B、AS41S	F	200 ~ 250	120 ~ 150	3 ~ 12	55 ~ 80

- 注：1. 熔模铸造 (L) 产品性能与永久模铸造产品相似。
2. 拉伸试样不在铸件上切取，而是另外铸造，其形状、尺寸符合 ISO 6892。砂型铸造和永久模铸造的产品拉伸试样直径不小于 12mm，熔模铸造产品拉伸试样直径不小于 5mm。模压铸造产品拉伸试样横截面积为 20mm<sup>2</sup>，最小厚度为 2mm。
3. 表中模压铸造产品拉伸试验结果仅供参考。
4. 供需双方也可商定在铸件某部位上切取拉伸试样，但其试验结果与表中数值可能有差异。
5. 表中砂型铸造及永久模铸造产品的布氏硬度值仅供参考。
6. F 为铸态：适用于铸造过程中通过一定温度控制获得某些性能的产品。T4 为固溶热处理后自然时效状态：适用于固溶热处理后不再进一步处理的产品。T6 为固溶热处理后人工时效状态：适用于固溶热处理后进行人工时效的产品。T5 为铸造冷却后人工时效状态：适用于由铸造冷却后进行人工时效以改善力学性能或稳定尺寸的产品。

18.5.2 便携式工具用镁合金压铸件的力学性能（表 18-7）

表 18-7 便携式工具用镁合金压铸件的力学性能（YS/T 626—2007）

合金牌号	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ $/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
AZ91D	200 ~ 260	140 ~ 170	1 ~ 6	65 ~ 85
AM60B	190 ~ 250	120 ~ 150	4 ~ 14	55 ~ 70

第 19 章 铜及铜合金的力学性能

19.1 铜及铜合金板带材的力学性能

19.1.1 无氧铜板带材的力学性能（表 19-1）

表 19-1 无氧铜板带材的力学性能（GB/T 14594—2005）

牌 号	状态 <sup>①</sup>	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
TU0、TU1、TU2	M	195 ~ 260	≥40	45 ~ 65
	Y <sub>4</sub>	215 ~ 275	≥30	50 ~ 70
	Y <sub>2</sub>	245 ~ 315	≥15	85 ~ 110
	Y	≥275	—	≥100

① 加工铜及铜合金产品的状态有：软态(M)、硬态(Y)、1/4 硬态(Y<sub>4</sub>)、1/2 硬态(Y<sub>2</sub>)、特硬态(T)、弹硬态(TY)、人工时效(S)、冷加工 + 人工时效(YS)，如果是经过淬火，均在状态代号前加 C。

19.1.2 电子元器件用铍青铜板带材的力学性能（表 19-2）

表 19-2 电子元器件用铍青铜板带材的力学性能（SJ 20715—1998）

牌 号	品种	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 HV
QBeMg1.7-0.1 QBeMg1.9-0.1	板、带	C	410 ~ 540	>35	90 ~ 160
		CY <sub>4</sub>	510 ~ 620	>10	145 ~ 220
		CY <sub>2</sub>	590 ~ 695	>5	180 ~ 240
		CY	685 ~ 835	>2	210 ~ 270

19.1.3 电子元器件用铍青铜板带材时效处理后的力学性能（表 19-3）

表 19-3 电子元器件用铍青铜板带材时效处理后的力学性能（SJ 20715—1998）

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	厚度/mm	硬度 HV
QBeMg1.9-0.1	C	≥0.16	≥1100	>3.0	0.16 ~ 2.0	325 ~ 400
	CY <sub>4</sub>	≥0.16	≥1180	>2.0	0.16 ~ 2.0	350 ~ 430
	CY <sub>2</sub>	≥0.16	≥1240	—	0.16 ~ 2.0	360 ~ 440
	CY	≥0.16	≥1270	—	0.16 ~ 2.0	380 ~ 450



(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	厚度/mm	硬度 HV
QBeMg1.7-0.1	C	$\geq 0.16$	$\geq 1030$	$> 3.0$	0.16 ~ 2.0	310 ~ 370
	CY <sub>4</sub>	$\geq 0.16$	$\geq 1100$	$> 2.0$	0.16 ~ 2.0	330 ~ 410
	CY <sub>2</sub>	$\geq 0.16$	$\geq 1180$	—	0.16 ~ 2.0	345 ~ 420
	CY	$\geq 0.16$	$\geq 1230$	—	0.16 ~ 2.0	360 ~ 430

19.1.4 电缆用铜带的力学性能（表 19-4）

表 19-4 电缆用铜带的力学性能（GB/T 11091—2005）

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
TU1、TU2	M	200 ~ 260	65 ~ 100	$\geq 35$	50 ~ 60
	Y <sub>8</sub>	220 ~ 275	70 ~ 105	$\geq 32$	50 ~ 65
	Y <sub>4</sub>	235 ~ 290		$\geq 30$	55 ~ 70
T2、TP1	M	220 ~ 270	70 ~ 110	$\geq 30$	50 ~ 65
	Y <sub>8</sub>	230 ~ 285	75 ~ 120	$\geq 28$	55 ~ 70
	Y <sub>4</sub>	245 ~ 300		$\geq 25$	—

19.1.5 导电用铜板和条的力学性能（表 19-5）

表 19-5 导电用铜板和条的力学性能（GB/T 2529—2005）（单位：mm）

牌号	供应状态	拉 伸 试 验		硬 度 试 验	
		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV	硬度 HRF
T2	热轧 (R)	$\geq 195$	$\geq 30$	—	—
	软 (M)	$\geq 195$	$\geq 35$	—	—
	1/8 硬 (Y <sub>8</sub> )	215 ~ 275	$\geq 25$	—	$\geq 50$
	1/2 硬 (Y <sub>2</sub> )	245 ~ 335	$\geq 10$	75 ~ 120	$\geq 80$
	硬 (Y)	$\geq 295$	$\geq 3$	$\geq 80$	$\geq 65$

19.1.6 连铸结晶器用铜板的力学性能（表 19-6）

表 19-6 连铸结晶器用铜板的力学性能（YB/T 4119—2004）

牌 号		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 HBW
I	CuCrZr	$\geq 400$	$\geq 280$	$\geq 15$	$\geq 110$
	CuAg	$\geq 280$	$\geq 265$	$\geq 17$	$\geq 90$
	CuNiBe	$\geq 630$	$\geq 510$	$\geq 14$	$\geq 200$

(续)

牌 号		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 HBW
II	CuCrZr	$\geq 345$	$\geq 235$	$\geq 25$	$\geq 100$
	CuAg	$\geq 250$	$\geq 200$	$\geq 12$	$\geq 85$

19.1.7 变压器用铜带的力学性能（表 19-7）

表 19-7 变压器用铜带的力学性能（GB/T 18813—2002）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
		$\geq$	$\geq$	
TU1、T2	M	195	35	45 ~ 65

19.1.8 铍青铜板带材的力学性能（表 19-8）

表 19-8 铍青铜板带材的力学性能（YS/T 323—2002）

合金牌号	材料状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%) \geq$	硬度 HV
QBe2 QBe1.9	C	390 ~ 590	30	$\leq 140$
QBe2 QBe1.9	CY <sub>4</sub>	520 ~ 630	10	120 ~ 220
QBe2 QBe1.9 QBe1.7	CY <sub>2</sub>	570 ~ 695	6	140 ~ 240
QBe2	CY	$\geq 635$	2.5	$\geq 170$
QBe1.9				$\geq 160$
QBe1.7		$\geq 590$		$\geq 150$
QBe2	CS	$\geq 1125$	2.0	$\geq 320$
QBe1.9				$\geq 350$
QBe2 QBe1.9	CY <sub>4</sub> S	$\geq 1135$	2.0	320 ~ 420
QBe2 QBe1.9	CY <sub>2</sub> S	$\geq 1145$	1.5	340 ~ 440
QBe1.7		$\geq 1030$	2.0	
QBe2	CYS	$\geq 1175$	1.5	$\geq 360$
QBe1.9				$\geq 370$
QBe1.7		$\geq 1080$	2.0	$\geq 340$

19.1.9 铜及铜合金板材的力学性能（表 19-9）

表 19-9 铜及铜合金板材的力学性能（GB/T 2040—2008）

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验		
		厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	厚度 /mm	硬度 HV	硬度 HRB
T2、T3 TP1、TP2 TU1、TU2	R	4~14	$\geq 195$	$\geq 30$	—	—	—
	M	0.3~10	$\geq 205$	$\geq 30$	$\geq 0.3$	$\leq 70$	—
	Y <sub>1</sub>		215~275	$\geq 25$		60~90	—
	Y <sub>2</sub>		245~345	$\geq 8$		80~110	—
	Y		295~380	—		90~120	—
	T		$\geq 350$	—		$\geq 110$	—
HSn62-1	R	4~14	$\geq 340$	$\geq 20$	—	—	—
	M	0.3~10	$\geq 295$	$\geq 35$	—	—	—
	Y <sub>2</sub>		350~400	$\geq 15$	—	—	—
	Y		$\geq 390$	$\geq 5$	—	—	—
HMn57-3-1	R	4~8	$\geq 440$	$\geq 10$	—	—	—
HMn55-3-1	R	4~15	$\geq 490$	$\geq 15$	—	—	—
HA160-1-1	R	4~15	$\geq 440$	$\geq 15$	—	—	—
HA167-2.5	R	4~15	$\geq 390$	$\geq 15$	—	—	—
HA166-6-3-2	R	4~8	$\geq 685$	$\geq 3$	—	—	—
HNi65-5	R	4~15	$\geq 290$	$\geq 35$	—	—	—
QA15	M	0.4~12	$\geq 275$	$\geq 33$	—	—	—
	Y		$\geq 585$	$\geq 2.5$	—	—	—
QA17	Y <sub>2</sub>	0.4~12	585~740	$\geq 10$	—	—	—
	Y		$\geq 635$	$\geq 5$	—	—	—
QA19-2	M	0.4~12	$\geq 400$	$\geq 18$	—	—	—
	Y		$\geq 585$	$\geq 5$	—	—	—
QA19-4	Y	0.4~12	$\geq 585$	—	—	—	—
QSn6.5-0.1	R	9~14	$\geq 290$	$\geq 38$	—	—	—
	M	0.2~12	$\geq 315$	$\geq 40$	$\geq 0.2$	$\leq 120$	—
	Y <sub>4</sub>	0.2~12	390~510	$\geq 35$		110~155	—
	Y <sub>2</sub>	0.2~12	490~610	$\geq 8$		150~190	—
	Y	0.2~3	590~690	$\geq 5$		180~230	—

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验		
		厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	厚度 /mm	硬度 HV	硬度 HRB
QSn6.5-0.1	Y	>3~12	540~690	$\geq 5$	$\geq 0.2$	180~230	—
	T	0.2~5	635~720	$\geq 1$		200~240	—
	TY		$\geq 690$	—		$\geq 210$	—
QSn6.5-0.4 QSn7-0.2	M	0.2~12	$\geq 295$	$\geq 40$	—	—	—
	Y		540~690	$\geq 8$	—	—	—
	T		$\geq 665$	$\geq 2$	—	—	—
QSn4-3 QSn4-0.3	M	0.2~12	$\geq 290$	$\geq 40$	—	—	—
	Y		540~690	$\geq 3$	—	—	—
	T		$\geq 635$	$\geq 2$	—	—	—
QSn8-0.3	M	0.2~5	$\geq 345$	$\geq 40$	$\geq 0.2$	$\leq 120$	—
	Y <sub>4</sub>		390~510	$\geq 35$		100~160	—
	Y <sub>2</sub>		490~610	$\geq 20$		150~205	—
	Y		590~705	$\geq 5$		180~235	—
	T		$\geq 685$	—		$\geq 210$	—
QCd1	Y	0.5~10	$\geq 390$	—	—	—	—
QCr0.5 QCr0.5-0.2-0.1	Y	—	—	—	0.5~15	$\geq 110$	—
QMn1.5	M	0.5~5	$\geq 205$	$\geq 30$	—	—	—
QMn5	M	0.5~5	$\geq 290$	$\geq 30$	—	—	—
	Y		$\geq 440$	$\geq 3$	—	—	—
QSi3-1	M	0.5~10	$\geq 340$	$\geq 40$	—	—	—
	Y		585~735	$\geq 3$	—	—	—
	T		$\geq 685$	$\geq 1$	—	—	—
QSn4-4-2.5 QSn4-4-4	M	0.8~5	$\geq 290$	$\geq 35$	$\geq 0.8$	—	—
	Y <sub>3</sub>		390~490	$\geq 10$		—	65~85
	Y <sub>2</sub>		420~510	$\geq 9$		—	70~90
	Y		$\geq 510$	$\geq 5$		—	—
BZn15-20	M	0.5~10	$\geq 340$	$\geq 35$	—	—	—
	Y <sub>2</sub>		440~570	$\geq 5$	—	—	—
	Y		540~690	$\geq 1.5$	—	—	—
	T		$\geq 640$	$\geq 1$	—	—	—

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验		
		厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	厚度 /mm	硬度 HV	硬度 HRB
BZn18-17	M	0.5 ~ 5	$\geq 375$	$\geq 20$	$\geq 0.5$	—	—
	Y <sub>2</sub>		440 ~ 570	$\geq 5$		120 ~ 180	—
	Y		$\geq 540$	$\geq 3$		$\geq 150$	—
B5	R	7 ~ 14	$\geq 215$	$\geq 20$	—	—	—
	M	0.5 ~ 10	$\geq 215$	$\geq 30$	—	—	—
	Y		$\geq 370$	$\geq 10$	—	—	—
B19	R	7 ~ 14	$\geq 295$	$\geq 20$	—	—	—
	M	0.5 ~ 10	$\geq 290$	$\geq 25$	—	—	—
	Y		$\geq 390$	$\geq 3$	—	—	—
BFe10-1-1	R	7 ~ 14	$\geq 275$	$\geq 20$	—	—	—
	M	0.5 ~ 10	$\geq 275$	$\geq 28$	—	—	—
	Y		$\geq 370$	$\geq 3$	—	—	—
BFe30-1-1	R	7 ~ 14	$\geq 345$	$\geq 15$	—	—	—
	M	0.5 ~ 10	$\geq 370$	$\geq 20$	—	—	—
	Y		$\geq 530$	$\geq 3$	—	—	—
BA16-1.5	Y	0.5 ~ 12	$\geq 535$	$\geq 3$	—	—	—
BA13-3	CYS		$\geq 635$	$\geq 5$	—	—	—
BMn40-1.5	M	0.5 ~ 10	390 ~ 590	实测	—	—	—
	Y		$\geq 590$	实测	—	—	—
BMn3-12	M	0.5 ~ 10	$\geq 350$	$\geq 25$	—	—	—

19.1.10 铜及铜合金带材的力学性能（表 19-10）

表 19-10 铜及铜合金带材的力学性能（GB/T 2059—2008）

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度/mm	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)	硬度 HV	硬度 HRB
T2、T3	M	$\geq 0.2$	$\geq 195$	$\geq 30$	$\leq 70$	—
TU1、TU2	Y <sub>4</sub>		215 ~ 275	$\geq 25$	60 ~ 90	
TP1、TP2	Y <sub>2</sub>		245 ~ 345	$\geq 8$	80 ~ 110	

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)	硬度 HV	硬度 HRB
T2、T3 TU1、TU2 TP1、TP2	Y	≥0.2	295 ~ 380	≥3	90 ~ 120	—
	T		≥350	—	≥110	
H96	M	≥0.2	≥215	≥30	—	—
	Y		≥320	≥3		
H90	M	≥0.2	≥245	≥35	—	—
	Y <sub>2</sub>		330 ~ 440	≥5		
	Y		≥390	≥3		
H85	M	≥0.2	≥260	≥40	≤85	—
	Y <sub>2</sub>		305 ~ 380	≥15	80 ~ 115	
	Y		≥350	—	≥105	
H80	M	≥0.2	≥265	≥50	—	—
	Y		≥390	≥3		
H70 H68 H65	M	≥0.2	≥290	≥40	≤90	—
	Y <sub>4</sub>		325 ~ 410	≥35	85 ~ 115	
	Y <sub>2</sub>		355 ~ 460	≥25	100 ~ 130	
	Y		410 ~ 540	≥13	120 ~ 160	
	T		520 ~ 620	≥4	150 ~ 190	
	TY		≥570	—	≥180	
H63、H62	M	≥0.2	≥290	≥35	≤95	—
	Y <sub>2</sub>		350 ~ 470	≥20	90 ~ 130	
	Y		410 ~ 630	≥10	125 ~ 165	
	T		≥585	≥2.5	≥155	
H59	M	≥0.2	≥290	≥10	—	—
	Y		≥410	≥5	≥130	
HPb59-1	M	≥0.2	≥340	≥25	—	—
	Y <sub>2</sub>		390 ~ 490	≥12		
	Y		≥440	≥5		
	T	≥0.32	≥590	≥3		
HMn58-2	M	≥0.2	≥380	≥30	—	—
	Y <sub>2</sub>		440 ~ 610	≥25		
	Y		≥585	≥3		

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)	硬度 HV	硬度 HRB
HSn62-1	Y	$\geq 0.2$	390	$\geq 5$	—	—
QA15	M	$\geq 0.2$	$\geq 275$	$\geq 33$	—	—
	Y	$\geq 0.2$	$\geq 585$	$\geq 2.5$	—	—
QA17	Y <sub>2</sub>	$\geq 0.2$	585 ~ 740	$\geq 10$	—	—
	Y		$\geq 635$	$\geq 5$		
QA19-2	M	$\geq 0.2$	$\geq 440$	$\geq 18$	—	—
	Y		$\geq 585$	$\geq 5$		
	T		$\geq 880$	—		
QA19-4	Y	$\geq 0.2$	$\geq 635$	—	—	—
QSn4-3 QSn4-0.3	M	$> 0.15$	$\geq 290$	$\geq 40$	—	—
	Y		540 ~ 690	$\geq 3$		
	T		$\geq 635$	$\geq 2$		
QSn6.5-0.1	M	$> 0.15$	$\geq 315$	$\geq 40$	$\leq 120$	—
	Y <sub>4</sub>		390 ~ 510	$\geq 35$	110 ~ 155	
	Y <sub>2</sub>		490 ~ 610	$\geq 10$	150 ~ 190	
	Y		590 ~ 690	$\geq 8$	180 ~ 230	
	T		635 ~ 720	$\geq 5$	200 ~ 240	
	TY		$\geq 690$	—	$\geq 210$	
QSn7-0.2 QSn6.5-0.4	M	$> 0.15$	$\geq 295$	$\geq 40$	—	—
	Y		540 ~ 690	$\geq 8$		
	T		$\geq 665$	$\geq 2$		
QSn8-0.3	M	$\geq 0.2$	$\geq 345$	$\geq 45$	$\leq 120$	—
	Y <sub>4</sub>		390 ~ 510	$\geq 40$	100 ~ 160	
	Y <sub>2</sub>		490 ~ 610	$\geq 30$	150 ~ 205	
	Y		590 ~ 705	$\geq 12$	180 ~ 235	
	T		$\geq 685$	$\geq 5$	$\geq 210$	
QSn4-4-4 QSn4-4-2.5	M	$\geq 0.8$	$\geq 290$	$\geq 35$	—	—
	Y <sub>3</sub>		390 ~ 490	$\geq 10$	—	65 ~ 85

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验			硬 度 试 验	
		厚度/mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)	硬度 HV	硬度 HRB
QSn4-4-4	Y <sub>2</sub>	≥0.8	420 ~ 510	≥9	—	70 ~ 90
QSn4-4-2.5	Y		≥490	≥5	—	—
QCd1	Y	≥0.2	≥390	—	—	—
QMn1.5	M	≥0.2	≥205	≥30	—	—
QMn5	M	≥0.2	≥290	≥30	—	—
	Y	≥0.2	≥440	≥3	—	—
QSi3-1	M	≥0.15	≥370	≥45	—	—
	Y	≥0.15	635 ~ 785	≥5		
	T	≥0.15	735	≥2		
BZn15-20	M	≥0.2	≥340	≥35	—	—
	Y <sub>2</sub>		440 ~ 570	≥5		
	Y		540 ~ 690	≥1.5		
	T		≥640	≥1		
BZn18-17	M	≥0.2	≥375	≥20	—	—
	Y <sub>2</sub>		440 ~ 570	≥5	120 ~ 180	
	Y		≥540	≥3	≥150	
B5	M	≥0.2	≥215	≥32	—	—
	Y		≥370	≥10		
B19	M	≥0.2	≥290	≥25	—	—
	Y		≥390	≥3		
BFe10-1-1	M	≥0.2	≥275	≥28	—	—
	Y		≥370	≥3		
BFe30-1-1	M	≥0.2	≥370	≥23	—	—
	Y		≥540	≥3		
BMn3-12	M	≥0.2	≥350	≥25	—	—
BMn40-1.5	M	≥0.2	390 ~ 590	实测数据	—	—
	Y		≥635			
BA13-3	CYS	≥0.2	供实测值		—	—
BA16-1.5	Y		≥600	≥5	—	—



## 19.1.11 散热器水室和主片用黄铜带材的力学性能 (表 19-11)

表 19-11 散热器水室和主片用黄铜带材的力学性能 (GB/T 2532—2005)

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$ $\geq$	硬度 HV $\leq$
H70	M	310 ~ 380	45	85
H68	TM	295 ~ 365	50	75

## 19.2 铜及铜合金箔材的力学性能

## 19.2.1 电解铜箔的力学性能 (表 19-12)

表 19-12 电解铜箔的力学性能 (GB/T 5230—1995)

单位面积重量 $/(g/m^2)$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		断后伸长率 $A(\%)$	
	标准箔	高延箔	标准箔	高延箔
	$\geq$			
<153	—	—	—	—
153	205	103	2	5
230	235	156	2.5	7.5
305	275	205	3	10
$\geq 610$	275	205	3	15

## 19.2.2 铜及铜合金箔材的力学性能 (表 19-13)

表 19-13 铜及铜合金箔材的力学性能 (GB/T 5187—2008)

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
T1、T2、T3 TU1、TU2	M	$\geq 205$	$\geq 30$	$\leq 70$
	Y <sub>4</sub>	215 ~ 275	$\geq 25$	60 ~ 90
	Y <sub>2</sub>	245 ~ 345	$\geq 8$	80 ~ 110
	Y	$\geq 295$	—	$\geq 90$
H68、H65、H62	M	$\geq 290$	$\geq 40$	$\leq 90$
	Y <sub>4</sub>	325 ~ 410	$\geq 35$	85 ~ 115
	Y <sub>2</sub>	340 ~ 460	$\geq 25$	100 ~ 130
	Y	400 ~ 530	$\geq 13$	120 ~ 160
	T	450 ~ 600	—	150 ~ 190
	TY	$\geq 500$	—	$\geq 180$

(续)

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
QSn6.5-0.1	Y	540 ~ 690	$\geq 6$	170 ~ 200
QSn7-0.2	T	$\geq 650$	—	$\geq 190$
QSn8-0.3	T	700 ~ 780	$\geq 11$	210 ~ 240
	TY	735 ~ 835	—	230 ~ 270
QSi3-1	Y	$\geq 635$	$\geq 5$	—
BZn15-20	M	$\geq 340$	$\geq 35$	—
	Y <sub>2</sub>	440 ~ 570	$\geq 5$	
	Y	$\geq 540$	$\geq 1.5$	
BZn18-18 BZn18-26	Y <sub>2</sub>	$\geq 525$	$\geq 8$	180 ~ 210
	Y	610 ~ 720	$\geq 4$	190 ~ 220
	T	$\geq 700$	—	210 ~ 240
BMn40-1.5	M	390 ~ 590	—	—
	Y	$\geq 635$		

19.2.3 散热器散热片专用纯铜及黄铜带箔材的力学性能（表 19-14）

表 19-14 散热器散热片专用纯铜及黄铜带箔材的力学性能（GB/T 2061—2004）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	$\geq$	硬度 HV
T3	Y	330 ~ 450		100 ~ 140
	T	380		—
H90	Y	400		—

19.3 铜及铜合金管材的力学性能

19.3.1 卫生洁具用黄铜管的力学性能（表 19-15）

表 19-15 卫生洁具用黄铜管的力学性能（YS/T 635—2007）

牌 号	状 态	硬度 HBW	硬度 HV	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
H62、H62A H63、H63A H65、H65A H68、H68A H70、H70A HPb59-1	M	65 ± 8	65 ± 8	330 ~ 375	—
	Y <sub>4</sub>	80 ± 8	82 ± 8	360 ~ 410	—
	Y <sub>2</sub>	110 ± 10	113 ± 10	390 ~ 440	—
	Y <sub>1</sub>	130 ± 10	135 ± 10	420 ~ 470	—
	Y	150 ± 10	155 ± 10	450 ~ 580	—

(续)

牌 号	状 态	硬度 HBW	硬度 HV	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
HA177-2	M	$\leq 80$	$\leq 85$	$\geq 345$	45
	Y <sub>2</sub>	80 ~ 125	85 ~ 130	$\geq 370$	40
	Y	$\geq 125$	$\geq 130$	$\geq 480$	10
HSn70-1	M	$\leq 75$	$\leq 80$	$\geq 295$	38
	Y <sub>2</sub>	75 ~ 120	80 ~ 125	$\geq 370$	30
	Y	$\geq 120$	$\geq 125$	$\geq 440$	10

19.3.2 电缆用无缝铜管的力学性能 (表 19-16)

表 19-16 电缆用无缝铜管的力学性能 (GB/T 19849—2005)

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
TU1、TU2、T2	软 (M)	205 ~ 260	$\geq 40$

19.3.3 压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 (表 19-17)

表 19-17 压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 (JB 4742—2000)

状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
退火	$\geq 460$	$\geq 195$	$\geq 35$

19.3.4 导电用无缝圆形铜管的力学性能 (表 19-18)

表 19-18 导电用无缝圆形铜管的力学性能 (GB/T 19850—2005)

状 态	尺寸范围/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
软 (M)	全部	200 ~ 255	40
半硬 (Y <sub>2</sub> )	壁厚 $\leq 5.0$	250 ~ 300	—
	壁厚 $> 5.0$	240 ~ 290	15
硬 (Y)	壁厚 $\leq 5.0$	290 ~ 360	—
	壁厚 $> 5.0$	270 ~ 320	6

19.3.5 连铸圆坯结晶器铜管的力学性能 (表 19-19)

表 19-19 连铸圆坯结晶器铜管的力学性能 (YB/T 4141—2005)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	硬度 HBW $\geq$
TU1、TU2	250	200	10	80

(续)

牌 号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	硬度 HBW $\geq$
TP2	250	200	10	80
CuAg0.1	250	200	12	80
CuCrZr	400	280	15	110

19.3.6 海水淡化装置用铜合金无缝管的力学性能（表 19-20）

表 19-20 海水淡化装置用铜合金无缝管的力学性能（GB/T 23609—2009）

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%) \geq$	硬度 HV
HAl77-2	M	340	120	48	70 ~ 100
	M <sub>2</sub>	390	150	38	85 ~ 130
BFe10-1-1	M	290	90	25	70 ~ 105
	M <sub>2</sub>	310	105	12	80 ~ 130
	Y	480	400	—	≈150
BFe30-1-1	M	370	120	30	90 ~ 120
	M <sub>2</sub>	450	150	10	110 ~ 160
BFe30-2-2	M	435	150	25	90 ~ 125
	M <sub>2</sub>	450	180	10	120 ~ 170
BFe16-1-1-0.5	M	310	—	—	—
	M <sub>2</sub>	345	—	—	—

19.3.7 换热器用铜及铜合金无缝翅片管的力学性能（表 19-21）

表 19-21 换热器用铜及铜合金无缝翅片管的力学性能（GB/T 19447—2004）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定残余延伸强度 $R_{0.5}/(N/mm^2) \geq$
TU0、TU1、TU2	M	205	62
TP1、TP2	Y <sub>2</sub>	250	205
Fe5-1.5-0.5	M	260	85
BFe10-1-1		275	105
BFe30-1-1		360	125
HAl77-2	M	345	125
HSn70-1		310	105
H85A		275	85

19.3.8 普通级铜及铜合金毛细管的力学性能（表 19-22）

表 19-22 普通级铜及铜合金毛细管的力学性能（GB/T 1531—2009）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 HV
TP2、T2、TP1	M	$\geq 205$	$\geq 40$	—
	Y <sub>2</sub>	245 ~ 370	—	—
	Y	$\geq 345$	—	—
H96	M	$\geq 205$	$\geq 42$	45 ~ 70
	Y	$\geq 320$	—	$\geq 90$
H90	M	$\geq 220$	$\geq 42$	40 ~ 70
	Y	$\geq 360$	—	$\geq 95$
H85	M	$\geq 240$	$\geq 43$	40 ~ 70
	Y <sub>2</sub>	$\geq 310$	$\geq 18$	75 ~ 105
	Y	$\geq 370$	—	$\geq 100$
H80	M	240	43	40 ~ 70
	Y <sub>2</sub>	320	25	80 ~ 115
	Y	390	—	$\geq 110$
H70、H68	M	280	43	50 ~ 80
	Y <sub>2</sub>	370	18	90 ~ 120
	Y	420	—	$\geq 110$
H65	M	290	43	50 ~ 80
	Y <sub>2</sub>	370	18	85 ~ 115
	Y	430	—	$\geq 105$
H63、H62	M	300	43	55 ~ 85
	Y <sub>2</sub>	370	18	70 ~ 105
	Y	440	—	$\geq 110$
QSn4-0.3	M	325	30	$\geq 90$
QSn6.5-0.1	Y	490	—	$\geq 120$

19.3.9 纯铜管材的力学性能（表 19-23）

表 19-23 纯铜管材的力学性能（GB/T 1527—2006）

牌 号	状 态	壁厚/mm	拉 伸 试 验		硬 度 试 验	
			抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$	硬度 HV <sup>①</sup>	硬度 HBW
T2、T3、TU1、 TU2、TP1、TP2	软 (M)	所有	200	40	40 ~ 65	35 ~ 60
	轻软 (M <sub>2</sub> )	所有	220	40	45 ~ 75	40 ~ 70
	半硬 (Y <sub>2</sub> )	所有	250	20	70 ~ 100	65 ~ 95
T2、T3、TU1、 TU2、TP1、TP2	硬 (Y)	$\leq 6$	290	—	95 ~ 120	90 ~ 115
		$> 6 \sim 10$	265	—	75 ~ 110	70 ~ 105
		$> 10 \sim 15$	250	—	70 ~ 100	65 ~ 95
	特硬 (T) <sup>②</sup>	所有	360	—	$\geq 110$	$\geq 150$

① 软 (M) 状态的维氏硬度试验仅适用于壁厚 $\geq 0.5\text{mm}$ 的管材。  
② 特硬状态的抗拉强度仅适用于壁厚 $\leq 3\text{mm}$ 的管材。

19.3.10 黄铜管材及白铜管材的力学性能（表 19-24）

表 19-24 黄铜管材及白铜管材的力学性能（GB/T 1527—2006）

牌 号	状态	拉 伸 试 验		硬 度 试 验	
		抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ ) $\geq$	断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	硬度 HV <sup>①</sup>	硬度 HBW <sup>②</sup>
H96	M	205	42	45 ~ 70	40 ~ 65
	M <sub>2</sub>	220	35	50 ~ 75	45 ~ 70
	Y <sub>2</sub>	260	18	75 ~ 105	70 ~ 100
	Y	320	—	$\geq 95$	$\geq 90$
H90	M	220	42	45 ~ 75	40 ~ 70
	M <sub>2</sub>	240	35	50 ~ 80	45 ~ 75
	Y <sub>2</sub>	300	18	75 ~ 105	70 ~ 100
	Y	360	—	$\geq 100$	$\geq 95$
H85、H85A	M	240	43	45 ~ 75	40 ~ 70
	M <sub>2</sub>	260	35	50 ~ 80	45 ~ 75
	Y <sub>2</sub>	310	18	80 ~ 110	75 ~ 105
	Y	370	—	$\geq 105$	$\geq 100$
H80	M	240	43	45 ~ 75	40 ~ 70
	M <sub>2</sub>	260	40	55 ~ 85	50 ~ 80
	Y <sub>2</sub>	320	25	85 ~ 120	80 ~ 115
	Y	390	—	$\geq 115$	$\geq 110$
H70、H68、H70A、 H68A	M	280	43	55 ~ 85	50 ~ 80
	M <sub>2</sub>	350	25	85 ~ 120	80 ~ 115
	Y <sub>2</sub>	370	18	95 ~ 125	90 ~ 120
	Y	420	—	$\geq 115$	$\geq 110$
H65、HPb66-0.5、 H65A	M	290	43	55 ~ 85	50 ~ 80
	M <sub>2</sub>	360	25	80 ~ 115	75 ~ 110
	Y <sub>2</sub>	370	18	90 ~ 120	85 ~ 115
	Y	430	—	$\geq 110$	$\geq 105$
H63、H62	M	300	43	60 ~ 90	55 ~ 85
	M <sub>2</sub>	360	25	75 ~ 110	70 ~ 105
	Y <sub>2</sub>	370	18	85 ~ 120	80 ~ 115
	Y	440	—	$\geq 115$	$\geq 110$
H59、HPb59-1	M	340	35	75 ~ 105	70 ~ 100
	M <sub>2</sub>	370	20	85 ~ 115	80 ~ 110
	Y <sub>2</sub>	410	15	100 ~ 130	95 ~ 125
	Y	470	—	$\geq 125$	$\geq 120$

(续)

牌 号	状态	拉 伸 试 验		硬 度 试 验	
		抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ ) $\geq$	断后伸长率 $A$ (%) $\geq$	硬度 HV <sup>①</sup>	硬度 HBW <sup>②</sup>
HSn70-1	M	295	40	60 ~ 90	55 ~ 85
	M <sub>2</sub>	320	35	70 ~ 100	65 ~ 95
	Y <sub>2</sub>	370	20	85 ~ 110	80 ~ 105
	Y	455	—	$\geq 110$	$\geq 105$
HSn62-1	M	295	35	60 ~ 90	55 ~ 85
	M <sub>2</sub>	335	30	75 ~ 105	70 ~ 100
	Y <sub>2</sub>	370	20	85 ~ 110	80 ~ 105
	Y	455	—	$\geq 110$	$\geq 105$
HPb63-0.1	Y <sub>2</sub>	353	20	—	110 ~ 165
	Y <sub>3</sub>	—	—	—	70 ~ 125
BZn15-20	M	295	35	—	—
	Y <sub>2</sub>	390	20	—	—
	Y	490	8	—	—
BFe10-1-1	M	290	30	75 ~ 110	70 ~ 105
	Y <sub>2</sub>	310	12	105	100
	Y	480	8	150	145
BFe30-1-1	M	370	35	135	130
	Y <sub>2</sub>	480	12	85 ~ 120	80 ~ 115

① 软 (M) 状态的维氏硬度试验仅适用于壁厚 $\geq 0.5mm$ 的管材。

② 布氏硬度试验仅适用于壁厚 $\geq 3mm$ 的管材。

19.3.11 拉杆天线套管的力学性能 (表 19-25)

表 19-25 拉杆天线套管的力学性能 (YS/T 267—1994)

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A_{11.3}$ (%)
		$\geq$	$\geq$
H62	Y	392	10

19.3.12 磁控管用无氧铜管的力学性能 (表 19-26)

表 19-26 磁控管用无氧铜管的力学性能 (GB/T 20301—2006)

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/$ ( $N/mm^2$ )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/$ ( $N/mm^2$ )	硬度 HV
TU0、TU1	Y <sub>2</sub>	250 ~ 325	$\geq 205$	—
	Y	$\geq 315$	$\geq 275$	$\geq 80$

19.4 铜及铜合金棒材的力学性能

19.4.1 电子元器件用铍青铜棒材的力学性能（表 19-27）

表 19-27 电子元器件用铍青铜棒材的力学性能（SJ 20716—1998）

牌 号	品种	状态	直径 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}/$ ( $N/mm^2$ ) $\geq$	硬度 HRB	断后伸长 率 $A(\%)$ $\geq$
QBeMg1.9-0.1	线	C	—	400 ~ 540	—	—	—
		CY <sub>4</sub>	—	620 ~ 795	—	—	—
		CY <sub>2</sub>	—	760 ~ 930	—	—	—
		CY <sub>3</sub>	—	895 ~ 1070	—	—	—
		CY	—	965 ~ 1140	—	—	—
	棒	C	—	410 ~ 590	140	45 ~ 85	20
		CY	$\leq 10$	660 ~ 900	520	88 ~ 103	8
			> 10 ~ 20	620 ~ 860	520	88 ~ 102	8
			> 20 ~ 40	590 ~ 830	520	88 ~ 101	8

19.4.2 电极材料用铬锆青铜棒的力学性能（表 19-28）

表 19-28 电极材料用铬锆青铜棒的力学性能（YS/T 584—2006）

牌 号	直径（最 小平行面 距离）/mm	抗拉强度	规定非比例 延伸强度	断后伸 长率	硬度 HRB	
		$R_m/$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}/$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	圆棒	矩形、 六角棒
		≥				
QZr0.15	≤25	415	345	10	65	
	>25 ~ 50	380	345		60	
	>50	380	330		55	
QCr1	7 ~ 25	450	380	9	75	70
	>25 ~ 50	410	345		70	65
	>50	380	310		65	—
QCr1-0.15	7 ~ 25	420	390	10	75	70
	>25 ~ 50	400	370		70	65
	>50	400	370		65	—



19.4.3 导电用铜棒的力学性能（表 19-29）

表 19-29 导电用铜棒的力学性能（YS/T 615—2006）

牌 号	状态	公称直径（对边距） /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$
T1、T2、TU1、 TU2、TAg0.1	R	12 ~ 90	195	30
	M	6 ~ 75	205	35
	Y	6 ~ 25	290	—
		> 25 ~ 50	275	—
		> 50 ~ 75	245	—

19.4.4 钟表用铅黄铜棒与线的力学性能（表 19-30）

表 19-30 钟表用铅黄铜棒与线的力学性能（QB/T 1542—2005）

材 料		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			断后伸长率 $A (%)$		
		T	Y	$Y_2$	T	Y	$Y_2$
直径 /mm	$\leq 8.00$	$\geq 608$	$\geq 568$	$\geq 500$	$\geq 2$	$\geq 3$	$\geq 4$
	$> 8.00 \sim 14.00$	—	$\geq 549$		—	$\geq 4$	$\geq 5$
六角棒		440 ~ 590			15 ~ 30		
拉花棒		$\geq 390$			$\geq 12$		

19.4.5 热锻水暖管件用黄铜棒的力学性能（表 19-31）

表 19-31 热锻水暖管件用黄铜棒的力学性能（YS/T 583—2006）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A(\%)$ $\geq$
HPb62-2-0.1	R	315	20
	$Y_2$	370	15
HPb61-2-1	R	315	20
	$Y_2$	370	15
HPb61-2-0.1	R	315	20
	$Y_2$	365	15
HPb59-3	R	320	12
	$Y_2$	350	10
HPb59-1	R	365	20
	$Y_2$	390	10
HPb59-2	R	320	15
	$Y_2$	350	10

19.4.6 铍青铜棒的力学性能（表 19-32）

表 19-32 铍青铜棒的力学性能（YS/T 334—2009）

牌 号	状态	直径/mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延 伸强度 $R_{p0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%) ≥	硬度 HRB
QBe2	R	20 ~ 120	450 ~ 700	≥140	10	≥45
QBe1.9	M	5 ~ 120	400 ~ 600	≥140	30	45 ~ 85
QBe1.9-0.1	Y <sub>2</sub>	5 ~ 40	550 ~ 700	≥450	10	≥78
QBe1.7	Y	5 ~ 10	660 ~ 900	≥520	5	≥88
C17000		> 10 ~ 25	620 ~ 860	≥520	5	
C17200		> 25	590 ~ 830	≥510	5	
C17300						
QBe0.6-2.5	M	5 ~ 120	≥240	—	20	20 ~ 50
QBe0.4-1.8	R	20 ~ 120				
QBe0.3-1.5	Y	5 ~ 40	≥440	—	5	60 ~ 80

19.4.7 铜及铜合金圆形棒、方形棒和六角形棒材的力学性能（表 19-33）

表 19-33 铜及铜合金圆形棒、方形棒和六角形棒材的力学性能（GB/T 4423—2007）

牌 号	状态	直径、对边距 /mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
			≥		
T2 T3	Y	3 ~ 40	275	10	—
		> 40 ~ 60	245	12	—
		> 60 ~ 80	210	16	—
	M	3 ~ 80	200	40	—
TU1 TU2 TP2	Y	3 ~ 80	—	—	—
H96	Y	3 ~ 40	275	8	—
		> 40 ~ 60	245	10	—
		> 60 ~ 80	205	14	—
	M	3 ~ 80	200	40	—
H90	Y	3 ~ 40	330	—	—
H80	Y	3 ~ 40	390	—	—
	M	3 ~ 40	275	50	—

(续)

牌 号	状态	直径、对边距 /mm	抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
			$\geq$		
H68	Y <sub>2</sub>	3 ~ 12	370	18	—
		> 12 ~ 40	315	30	—
		> 40 ~ 80	295	34	—
	M	13 ~ 35	295	50	—
H65	Y	3 ~ 40	390	—	—
	M	3 ~ 40	295	44	—
H62	Y <sub>2</sub>	3 ~ 40	370	18	—
		> 40 ~ 80	335	24	—
HPb61-1	Y <sub>2</sub>	3 ~ 20	390	11	—
HPb59-1	Y <sub>2</sub>	3 ~ 20	420	12	—
		> 20 ~ 40	390	14	—
		> 40 ~ 80	370	19	—
HPb63-0.1 H63	Y <sub>2</sub>	3 ~ 20	370	18	—
		> 20 ~ 40	340	21	—
HPb63-3	Y	3 ~ 15	490	4	—
		> 15 ~ 20	450	9	—
		> 20 ~ 30	410	12	—
	Y <sub>2</sub>	3 ~ 20	390	12	—
		> 20 ~ 60	360	16	—
HSn62-1	Y	4 ~ 40	390	17	—
		> 40 ~ 60	360	23	—
HMn58-2	Y	4 ~ 12	440	24	—
		> 12 ~ 40	410	24	—
		> 40 ~ 60	390	29	—
HFe58-1-1	Y	4 ~ 40	440	11	—
		> 40 ~ 60	390	13	—
HFe59-1-1	Y	4 ~ 12	490	17	—
		> 12 ~ 40	440	19	—
		> 40 ~ 60	410	22	—
QA19-2	Y	4 ~ 40	540	16	—
QA19-4	Y	4 ~ 40	580	13	—

(续)

牌 号	状态	直径、对边距 /mm	抗拉强度 $R_m$ / ( $N/mm^2$ )	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HBW
			$\geq$		
QA110-3-1.5	Y	4 ~ 40	630	8	—
QSi3-1	Y	4 ~ 12	490	13	—
		> 12 ~ 40	470	19	—
QSi1.8	Y	3 ~ 15	500	15	—
QSn6.5-0.1 QSn6.5-0.4	Y	3 ~ 12	470	13	—
		> 12 ~ 25	440	15	—
		> 25 ~ 40	410	18	—
QSn7-0.2	Y	4 ~ 40	440	19	130 ~ 200
	T	4 ~ 40	—	—	$\geq 180$
QSn4-0.3	Y	4 ~ 12	410	10	—
		> 12 ~ 25	390	13	—
		> 25 ~ 40	355	15	—
QSn4-3	Y	4 ~ 12	430	14	—
		> 12 ~ 25	370	21	—
		> 25 ~ 35	335	23	—
		> 35 ~ 40	315	23	—
QCd1	Y	4 ~ 60	370	5	$\geq 100$
	M	4 ~ 60	215	36	$\leq 75$
QCr0.5	Y	4 ~ 40	390	6	—
	M	4 ~ 40	230	40	—
QZr0.2 QZr0.4	Y	3 ~ 40	294	6	130
BZn15-20	Y	4 ~ 12	440	6	—
		> 12 ~ 25	390	8	—
		> 25 ~ 40	345	13	—
	M	3 ~ 40	295	33	—
BZn15-24-1.5	T	3 ~ 18	590	3	—
	Y	3 ~ 18	440	5	—
	M	3 ~ 18	295	30	—
BFe30-1-1	Y	16 ~ 50	490	—	—
	M	16 ~ 50	345	25	—
BMn40-1.5	Y	7 ~ 20	540	6	—
		> 20 ~ 30	490	8	—
		> 30 ~ 40	440	11	—

19.4.8 铜及铜合金矩形棒材的力学性能（表 19-34）

表 19-34 铜及铜合金矩形棒材的力学性能（GB/T 4423—2007）

牌 号	状 态	高度/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
			$\geq$	
T2	M	3 ~ 80	196	36
	Y	3 ~ 80	245	9
H62	$Y_2$	3 ~ 20	335	17
		> 20 ~ 80	335	23
HPb59-1	$Y_2$	5 ~ 20	390	12
		> 20 ~ 80	375	18
HPb63-3	$Y_2$	3 ~ 20	380	14
		> 20 ~ 80	365	19

19.4.9 铅黄铜拉花棒的力学性能（表 19-35）

表 19-35 铅黄铜拉花棒的力学性能（YS/T 76—1994）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
		$\geq$	
HPb59-1	半硬 ( $Y_2$ )	390	10

19.5 铜及铜合金线材的力学性能

19.5.1 电力牵引用铜及铜合金双沟形接触线的力学性能（表 19-36）

表 19-36 电力牵引用铜及铜合金双沟形接触线的力学性能（GB/T 12971.1—2008）

型 号	拉断力/kN $\geq$	高温残存拉 断力/kN $\geq$	断后伸长率 (%) $\geq$	扭转圈数 (至断开) $\geq$	反复弯曲（至断开）	
					弯心半径 /mm	次 数 $\geq$
CTY50	18.88	—	2.2	9	20	4
CTY65	23.21	—	2.4	9	20	4
CTY85	30.48	—	2.6	9	20	4
CTY100	34.50	—	3.0	9	20	4
CTY110	37.60	—	3.8	9	20	4

(续)

型 号	拉断力/kN ≥	高温残存拉 断力/kN ≥	断后伸长率 (%) ≥	扭转圈数 (至断开) ≥	反复弯曲 (至断开)	
					弯心半径 /mm	次 数 ≥
CT65	24.20	—	3.0	5	30	4
CT85	29.75	—	3.0	5	30	4
CT85 (T)	32.25	—	3.0	5	30	4
CT100	34.61	—	3.0	5	30	4
CT110	39.96	—	3.0	5	30	4
CT120	43.56	—	3.0	5	30	4
CT150	54.36	—	3.0	5	30	4
CTA85 CTA110 CTA120 CTA150	32.25	28.25	3.0	5	30	4
	39.96	34.96	3.0	5	30	4
	43.56	38.12	3.0	5	30	4
	54.36	47.56	3.0	5	30	4
CTM110	48.84	43.96	3.0	5	30	4
CTM120	52.03	46.83	3.0	5	30	4
CTM150	63.42	57.08	3.0	5	30	4
CTMH110	55.50	49.95	3.0	5	30	4
CTMH120	59.29	53.36	3.0	5	30	4
CTMH150	70.97	63.87	3.0	5	30	4
CTS110	47.73	42.96	3.0	5	30	4
CTS120	50.82	45.74	3.0	5	30	4
CTS150	63.42	57.08	3.0	5	30	4

19.5.2 电子器件用镀锡铜线的力学性能 (表 19-37)

表 19-37 电子器件用镀锡铜线的力学性能 (SJ 2422—1983)

公称直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 A (%) ≥	反 复 弯 折	
			负荷/g	次数 ≥
0.4	200	15	250	5
0.5	200	18	250	5
0.6	200	20	500	6
0.8	220	20	500	6
1.0	220	20	500	6
1.2	220	20	500	6

19.5.3 电工用铜扁线的力学性能（表 19-38）

表 19-38 电工用铜扁线的力学性能（GB/T 5584.2—2009）

公称尺寸/mm	型 号					
	TBR		TBY1		TBY2	
	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率 $A$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率 $A$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率 $A$
	$/(N/mm^2)$	(%)	$/(N/mm^2)$	(%)	$/(N/mm^2)$	(%)
	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$
0.80 ~ 2.00	275	30.0	275 ~ 373	1.5	373	0.4
>2.00 ~ 4.00	255	34.0	255 ~ 333	2.0	333	0.7
>4.00 ~ 5.60	245	36.0	245 ~ 304	3.0	304	1.7

19.5.4 电工用铜线坯的力学性能（表 19-39）

表 19-39 电工用铜线坯的力学性能（GB/T 3952—2008）

牌号	状态	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A$ (%)
			$\geq$	$\geq$
T1、TU1	R	6.0 ~ 35	—	40
T2、TU2			—	37
T3			—	35
TU1、TU2	Y	6.0 ~ 7.0	370	2.0
		>7.0 ~ 8.0	345	2.2
		>8.0 ~ 9.0	335	2.4
		>9.0 ~ 10.0	325	2.8
		>10.0 ~ 11.0	315	3.2
		>11.0 ~ 12.0	290	3.6

19.5.5 电工圆铜线的力学性能（表 19-40）

表 19-40 电工圆铜线的力学性能（GB/T 3953—2009）

公称直径 /mm	TR	TY		TYT	
	断后伸长率 $A$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率 $A$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率 $A$
	(%)	$/(N/mm^2)$	(%)	$/(N/mm^2)$	(%)
	$\geq$				
0.020	10	421	—	—	—
0.100	10	421	—	—	—
0.200	15	420	—	—	—

(续)

公称直径 /mm	TR	TY		TYT	
	断后伸长率 A (%)	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)
	≥				
0.290	15	419	—	—	—
0.300	15	419	—	—	—
0.380	20	418	—	—	—
0.480	20	417	—	—	—
0.570	20	416	—	—	—
0.660	25	415	—	—	—
0.750	25	414	—	—	—
0.850	25	413	—	—	—
0.940	25	412	0.5	—	—
1.03	25	411	0.5	—	—
1.12	25	410	0.5	—	—
1.22	25	409	0.5	—	—
1.31	25	408	0.6	—	—
1.41	25	407	0.6	—	—
1.50	25	406	0.6	446	0.6
1.56	25	405	0.6	445	0.6
1.60	25	404	0.6	445	0.6
1.70	25	403	0.6	444	0.6
1.76	25	403	0.7	443	0.7
1.83	25	402	0.7	442	0.7
1.90	25	401	0.7	441	0.7
2.00	25	400	0.7	440	0.7
2.12	25	399	0.7	439	0.7
2.24	25	398	0.8	438	0.8
2.36	25	396	0.8	436	0.8
2.50	25	395	0.8	435	0.8
2.62	25	393	0.9	434	0.9
2.65	25	393	0.9	433	0.9
2.73	25	392	0.9	432	0.9
2.80	25	391	0.9	432	0.9
2.85	25	391	0.9	431	0.9
3.00	25	389	1.0	430	1.0
3.15	30	388	1.0	428	1.0



(续)

公称直径 /mm	TR	TY		TYT	
	断后伸长率 A (%)	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)
	≥				
3.35	30	386	1.0	426	1.0
3.55	30	383	1.1	423	1.1
3.75	30	381	1.1	421	1.1
4.00	30	379	1.2	419	1.2
4.25	30	376	1.3	416	1.3
4.50	30	373	1.3	413	1.3
4.75	30	370	1.4	411	1.4
5.00	30	368	1.4	408	1.4
5.30	30	365	1.5	—	—
5.60	30	361	1.6	—	—
6.00	30	357	1.7	—	—
6.30	30	354	1.8	—	—
6.70	30	349	1.8	—	—
7.10	30	345	1.9	—	—
7.50	30	341	2.0	—	—
8.00	30	335	2.2	—	—
8.50	35	330	2.3	—	—
9.00	35	325	2.4	—	—
9.50	35	319	2.5	—	—
10.00	35	314	2.6	—	—
10.60	35	307	2.8	—	—
11.20	35	301	2.9	—	—
11.80	35	294	3.1	—	—
12.50	35	287	3.2	—	—
13.20	35	279	3.4	—	—
14.00	35	271	3.6	—	—

19.5.6 铜及铜合金扁线材的力学性能（表 19-41）

表 19-41 铜及铜合金扁线材的力学性能（GB/T 3114—1994）

牌 号	状态	规格尺寸（对边 距离）/mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{100mm}$ (%)
			≥	
T2	M	0.5 ~ 15.0	175	25
	Y	0.5 ~ 15.0	325	—

(续)

牌 号	状态	规格尺寸 (对边 距离) /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm} (%)$
			$\geq$	
H62	M	0.5 ~ 12.0	295	25
	Y <sub>2</sub>	0.5 ~ 12.0	345	10
	Y	0.5 ~ 12.0	460	—
H65 H68	M	0.5 ~ 12.0	245	28
	Y <sub>2</sub>	0.5 ~ 12.0	295	12
	Y	0.5 ~ 12.0	440	—
QSn6.5-0.1 QSn6.5-0.4	M	0.5 ~ 12.0	370	30
	Y <sub>2</sub>	0.5 ~ 12.0	390	10
	Y	0.5 ~ 12.0	540	—
QSn4-3 QSi3-1	Y	0.5 ~ 12.0	735	—

19.5.7 铍青铜线的力学性能 (表 19-42)

表 19-42 铍青铜线的力学性能 (YS/T 571—2009)

状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$			
M	400 ~ 580			
Y <sub>4</sub>	570 ~ 795			
Y <sub>2</sub>	710 ~ 930			
Y <sub>1</sub>	840 ~ 1070			
Y	915 ~ 1140			
状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	时效热处理工艺		
		温度/°C	时间/min	冷却方式
TF00	1050 ~ 1380	315 ± 5	180	空冷
TH01	1150 ~ 1450	315 ± 5	120	空冷
TH02	1200 ~ 1480	315 ± 5	90	空冷
TH03	1250 ~ 1585	315 ± 5	60	空冷
TH04	1300 ~ 1585	315 ± 5	60	空冷

19.5.8 镀银软圆铜线的力学性能 (表 19-43)

表 19-43 镀银软圆铜线的力学性能 (JB/T 3135—1999)

公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸长率 $A (%) \geq$	公称直径 /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) $\geq$	断后伸长率 $A (%) \geq$
0.050 ~ 0.100	—	5.5	0.260 ~ 0.500	196	20
0.110 ~ 0.150	196	10	0.510 ~ 1.000	196	25
0.160 ~ 0.250	196	15	1.100 ~ 2.000	196	25

19.6 铜及铜合金铸件的力学性能

19.6.1 铸造铜合金的力学性能（表 19-44）

表 19-44 铸造铜合金的力学性能（GB 1176—1987）

合 金 牌 号	铸 造 方 法	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	硬度 HBW ≥
ZCuSn2Zn8Pb6Ni1	S	175	—	8	590
	J	215		10	685
ZCuSn3Zn11Pb4	S	175	—	8	590
	J	215		10	
ZCuSn5Pb5Zn5	S、J	200	90	13	590
	Li、La	250	100		635
ZCuSn10Pb1	S	220	130	3	785
	J	310	170	2	885
	Li	330	170	4	
	La	360		6	
ZCuSn10Pb5	S	195	—	10	685
	J	245			
ZCuSn10Zn2	S	240	120	12	685
	J	245	140	6	785
	Li、La	270		7	
ZCuPb10Sn10	S	180	80	7	635
	J	220	140	5	685
	Li、La		110	6	
ZCuPb15Sn8	S	170	80	5	590
	J	200	100	6	635
	Li、La	220	100	8	
ZCuPb17Sn4Zn4	S	150	—	5	540
	J	175		7	590
ZCuPb20Sn5	S	150	60	5	440
	J		70	6	540
	La	180	80	7	

(续)

合 金 牌 号	铸 造 方 法	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	规定非比例延伸强 度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	硬度 HBW ≥
ZCuPb30	J	—	—	—	245
ZCuAl18Mn13Fe3	S	600	270	15	1570
	J	650	280	10	1665
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	S	645	280	20	1570
	J	670	310	18	1665
ZCuAl9Mn2	S	390	—	20	835
	J	440	—	20	930
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	S	630	250	16	1570
ZCuAl10Fe3	S	490	180	13	980
	J	540	200	15	1080
	Li、La				
ZCuAl10Fe3Mn2	S	490	—	15	1080
	J	540		20	1175
ZCuZn38	S	295	—	30	590
	J				685
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	S	725	380	10	1570
	J	740	400	7	1665
	Li、La		400		
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	S	600	300	18	1175
	J				1275
	Li、La				
ZCuZn31Al2	S	295	—	12	785
	J	390		15	885
ZCuZn35Al2Mn2Fe2	S	450	170	20	980
	J	475	200	18	1080
	Li、La				
ZCuZn38Mn2Pb2	S	245	—	10	685
	J	345		18	785
ZCuZn40Mn2	S	345	—	20	785
	J	390		25	885
ZCuZn40Mn3Fe1	S	440	—	18	980
	J	490		15	1080

(续)					
合金牌号	铸造方法	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$ ≥	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$ ≥	断后伸长率 $A(\%)$ ≥	硬度 HBW ≥
ZCuZn33Pb2	S	180	70	12	490
ZCuZn40Pb2	S	220	—	15	785
	J	280	120	20	885
ZCuZn16Si4	S	345	—	15	885
	J	390		20	980

19.6.2 压铸铜合金的力学性能（表 19-45）

表 19-45 压铸铜合金的力学性能（GB/T 15116—1994）

合金牌号	合金代号	力学性能 ≥		
		抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 HBW
YZCuZn40Pb	YT40-1 铅黄铜	300	6	85
YZCuZn16Si4	YT16-4 硅黄铜	345	25	85
YZCuZn30Al3	YT30-3 铝黄铜	400	15	110
YZCuZn35Al2Mn2Fe	YT35-2-2-1 铝锰铁黄铜	475	3	130

19.7 引线框架用铜及铜合金的力学性能（表 19-46）

表 19-46 引线框架用铜及铜合金的力学性能（GB/T 20254.1—2006）

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
TP2	M	205 ~ 275	≥35	50 ~ 70
	Y <sub>4</sub>	235 ~ 280	≥25	60 ~ 90
	Y <sub>2</sub>	275 ~ 345	≥8	85 ~ 105
	Y	≥300	≥5	≥100
QFe0.1	M	280 ~ 350	≥30	≤90
	Y <sub>4</sub>	300 ~ 360	≥20	90 ~ 115

(续)

牌 号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3}(\%)$	硬度 HV
QFe0.1	Y <sub>2</sub>	320 ~ 400	≥10	100 ~ 125
	Y	≥390	≥5	115 ~ 135
	T	≥430	≥2	≥130
QFe2.5	M	300 ~ 380	≥20	90 ~ 110
	Y <sub>4</sub>	320 ~ 400	≥15	100 ~ 120
	Y <sub>2</sub>	365 ~ 430	≥6	115 ~ 140
	Y	410 ~ 490	≥5	125 ~ 145
	T	450 ~ 500	≥3	135 ~ 150
	TY	480 ~ 530	≥2	140 ~ 155
	CT	500 ~ 550	≥2	≥145



第 20 章 锌、钛、镍及其合金的力学性能

20.1 铸造锌合金的力学性能（表 20-1）

表 20-1 铸造锌合金的力学性能（GB 1175—1997）

合金牌号	合金代号	铸造方法及 状态	抗拉强度 $R_m$ $/(N/mm^2)$ $\geq$	断后伸长率 $A$ $(\%)$ $\geq$	硬度 HBW $\geq$
ZZnAlCu1Mg	ZA4-1	JF	175	0.5	80
ZZnAl4Cu3Mg	ZA4-3	SF	220	0.5	90
		JF	240	1	100
ZZnAl6Cu1	ZA6-1	SF	180	1	80
		JF	220	1.5	80
ZZnAl8Cu1Mg	ZA8-1	SF	250	1	80
		JF	225	1	85
ZZnAl9Cu2Mg	ZA9-2	SF	275	0.7	90
		JF	315	1.5	105
ZZnAl11Cu1Mg	ZA11-1	SF	280	1	90
		JF	310	1	90
ZZnAl11Cu5Mg	ZA11-5	SF	275	0.5	80
		JF	295	1.0	100
ZZnAl27Cu2Mg	ZA27-2	SF	400	3	110
		ST3	310	8	90
		JF	420	1	110

20.2 钛及钛合金的力学性能

20.2.1 板式换热器钛板的力学性能（表 20-2）

表 20-2 板式换热器钛板的力学性能（GB/T 14845—2007）

牌号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$
$\geq$				
TA1	M	240	140	55
TA8-1		240	140	47
TA9-1				

20.2.2 钛及钛合金板材的力学性能（表 20-3）

表 20-3 钛及钛合金板材的力学性能（GB/T 3621—2007）

牌 号		状态	板材厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA1		M	0.3 ~ 25.0	$\geq 240$	140 ~ 310	30
TA2		M	0.3 ~ 25.0	$\geq 400$	275 ~ 450	25
TA3		M	0.3 ~ 25.0	$\geq 500$	380 ~ 550	20
TA4		M	0.3 ~ 25.0	$\geq 580$	485 ~ 655	20
TA5		M	0.5 ~ 1.0	$\geq 685$	$\geq 585$	20
			>1.0 ~ 2.0			15
			>2.0 ~ 5.0			12
			>5.0 ~ 10.0			12
TA6		M	0.8 ~ 1.5	$\geq 685$	—	20
			>1.5 ~ 2.0			15
			>2.0 ~ 5.0			12
			>5.0 ~ 10.0			12
TA7		M	0.8 ~ 1.5	735 ~ 930	$\geq 685$	20
			1.6 ~ 2.0			15
			>2.0 ~ 5.0			12
			>5.0 ~ 10.0			12
TA8		M	0.8 ~ 10	$\geq 400$	275 ~ 450	20
TA8-1		M	0.8 ~ 10	$\geq 240$	140 ~ 310	24
TA9		M	0.8 ~ 10	$\geq 400$	275 ~ 450	20
TA9-1		M	0.8 ~ 10	$\geq 240$	140 ~ 310	24
TA10	A 类	M	0.8 ~ 10.0	$\geq 485$	$\geq 345$	18
	B 类	M	0.8 ~ 10.0	$\geq 345$	$\geq 275$	25
TA11		M	5.0 ~ 12.0	$\geq 895$	$\geq 825$	10
TA13		M	0.5 ~ 2.0	540 ~ 770	460 ~ 570	18
TA15		M	0.8 ~ 1.8	930 ~ 1130	$\geq 855$	12
			>1.8 ~ 4.0			10
			>4.0 ~ 10.0			8
TA17		M	0.5 ~ 1.0	685 ~ 835	—	25
			1.1 ~ 2.0			15
			2.1 ~ 4.0			12
			4.1 ~ 10.0			10



(续)

牌 号	状态	板材厚度 /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA18	M	0.5 ~ 2.0	590 ~ 735	—	25
		>2.0 ~ 4.0			20
		>4.0 ~ 10.0			15
TB2	ST	1.0 ~ 3.5	$\leq 980$	—	20
	STA		1320		8
TB5	ST	0.8 ~ 1.75	705 ~ 945	690 ~ 835	12
		>1.75 ~ 3.18			10
TB6	ST	1.0 ~ 5.0	$\geq 1000$	—	6
TB8	ST	0.3 ~ 0.6	825 ~ 1000	795 ~ 965	6
		>0.6 ~ 2.5			8
TC1	M	0.5 ~ 1.0	590 ~ 735	—	25
		>1.0 ~ 2.0			25
		>2.0 ~ 5.0			20
		>5.0 ~ 10.0			20
TC2	M	0.5 ~ 1.0	$\geq 685$	—	25
		>1.0 ~ 2.0			15
		>2.0 ~ 5.0			12
		>5.0 ~ 10.0			12
TC3	M	0.8 ~ 2.0	$\geq 880$		12
		>2.0 ~ 5.0			10
		>5.0 ~ 10.0			10
TC4	M	0.8 ~ 2.0	$\geq 895$	$\geq 830$	12
		>2.0 ~ 5.0			10
		>5.0 ~ 10.0			10
		>10.0 ~ 25.0			8
TC4ELI	M	0.8 ~ 25.0	$\geq 860$	$\geq 795$	10

20.2.3 钛及钛合金板材的高温力学性能（表 20-4）

表 20-4 钛及钛合金板材的高温力学性能（GB/T 3621-2007）

合金牌号	板材厚度/mm	试验温度/℃	抗拉强度 $/(N/mm^2) \geq$	持久强度 (100h) $/(N/mm^2) \geq$
TA6	0.8 ~ 10	350	420	390
		500	340	195

(续)

合金牌号	板材厚度/mm	试验温度/℃	抗拉强度 /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	持久强度 (100h) /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥
TA7	0.8 ~ 10	350	490	440
		500	440	195
TA11	5.0 ~ 12	425	620	—
TA15	0.8 ~ 10	500	635	440
		550	570	440
TA17	0.5 ~ 10	350	420	390
		400	390	360
TA18	0.5 ~ 10	350	340	320
		400	310	280
TC1	0.5 ~ 10	350	340	320
		400	310	295
TC2	0.5 ~ 10	350	420	390
		400	390	360
TC3、TC4	0.8 ~ 10	400	590	540
		500	440	195

20.2.4 钛及钛合金带、箔材的力学性能（表 20-5）

表 20-5 钛及钛合金带、箔材的力学性能（GB/T 3622—1999）

牌号	状态	产品厚度 /mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> )	规定残余延伸强度 $R_{r0.2}$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 (%) ≥	
					$A_{50mm}$	$A_{100mm}$
TA0	M	0.3 ~ <0.5	280 ~ 420	170	—	40
		0.5 ~ 2.0			45	—
TA1	M	0.3 ~ <0.5	370 ~ 530	250	—	35
		0.5 ~ 2.0			40	—
TA2	M	0.3 ~ <0.5	440 ~ 620	320	—	30
		0.5 ~ 1.0			35	—
		1.1 ~ 2.0			30	—
TA9	M	0.3 ~ <0.5	370 ~ 530	250	—	25
		0.5 ~ 2.0			30	—
TA10	M	0.3 ~ <0.5	485	—	—	15
		0.5 ~ 2.0			18	—

20.2.5 工业流体用焊接钛及钛合金管的力学性能（表 20-6）

表 20-6 工业流体用焊接钛及钛合金管的力学性能（YS/T 576—2006）

合金牌号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA0	退火态 (M)	280 ~ 420	170	22
TA1		370 ~ 530	250	18
TA2		440 ~ 620	320	18
TA9		370 ~ 530	250	18
TA10		$\geq 440$	290	18

20.2.6 钛及钛合金管材的力学性能（表 20-7）

表 20-7 钛及钛合金管材的力学性能（GB/T 3624—1995）

牌 号	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定残余延伸强度 $R_{r0.2}/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
TA0	退火态 (M)	280 ~ 420	170	24
TA1		370 ~ 530	250	20
TA2		440 ~ 620	320	18
TA9		370 ~ 530	250	20
TA10		$\geq 440$	—	18

20.2.7 换热器及冷凝器用钛及钛合金管材的力学性能（表 20-8）

表 20-8 换热器及冷凝器用钛及钛合金管材的力学性能（GB/T 3625—2007）

合金牌号	状 态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{50mm}(\%) \geq$
TA1	退火态 (M)	240	140 ~ 310	24
TA2		400	275 ~ 450	20
TA3		500	380 ~ 550	18
TA9		400	275 ~ 450	20
TA9-1		240	140 ~ 310	24
TA10		460	$\geq 300$	18

20.2.8 钛及钛合金结构件丝热处理后的力学性能（表 20-9）

表 20-9 钛及钛合金结构件丝热处理后的力学性能（GB/T 3623—2007）

牌 号	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA1	4.0 ~ 7.0	$\geq 240$	24
TA2		$\geq 400$	20

(续)

牌 号	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA3	4.0 ~ 7.0	$\geq 500$	18
TA4		$\geq 580$	15
TA1	0.1 ~ 4.0	$\geq 240$	15
TA2		$\geq 400$	12
TA3		$\geq 500$	10
TA4		$\geq 580$	8
TA1-1	1.0 ~ 7.0	295 ~ 470	30
TC4ELI	1.0 ~ 7.0	$\geq 860$	10
TC4	1.0 ~ 2.0	$\geq 925$	8
	> 2.0 ~ 7.0	$\geq 895$	10

20.2.9 外科植入物用钛及钛合金加工丝材的力学性能（表 20-10）

表 20-10 外科植入物用钛及钛合金加工丝材的力学性能（GB/T 13810—2007）

牌号	状态	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 $A(\%) \geq$
TA1ELI	M	3.2 ~ 7.0	200	30
TA1	M		240	24
TA2	M		400	20
TA3	M		500	18
TA4	M		580	15
TA1ELI	M	0.5 ~ 3.2	200	18
TA1	M		240	15
TA2	M		400	12
TA3	M		500	10
TA4	M		580	8
TC4	M	1.0 ~ 2.0	925	8
	M	> 2.0 ~ 7.0	895	10
TC4ELI	M	1.0 ~ 7.0	860	10
TC20	M	1.0 ~ 7.0	900	10

20.2.10 钛及钛合金棒材的力学性能（表 20-11）

表 20-11 钛及钛合金棒材的力学性能（GB/T 2965—2007）

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	备注
TA1	240	140	24	30	
TA2	400	275	20	30	
TA3	500	380	18	30	

(续)

牌号	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$	备注
TA4	580	485	15	25	
TA5	685	585	15	40	
TA6	685	585	10	27	
TA7	785	680	10	25	
TA9	370	250	20	25	
TA10	485	345	18	25	
TA13	540	400	16	35	
TA15	885	825	8	20	
TA19	895	825	10	25	
TB2	≤980	820	18	40	淬火性能
	1370	1100	7	10	时效性能
TC1	585	460	15	30	
TC2	685	560	12	30	
TC3	800	700	10	25	
TC4	895	825	10	25	
TC4ELI	830	760	10	15	
TC6	980	840	10	25	
TC9	1060	910	9	25	
TC10	1030	900	12	25	
TC11	1030	900	10	30	
TC12	1150	1000	10	25	

20.2.11 钛及钛合金饼和环的力学性能（表 20-12）

表 20-12 钛及钛合金饼和环的力学性能（GB/T 16598—1996）

牌号	截面积 $/cm^2$	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	规定残余延伸强度 $R_{p0.2}/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
TA0	≤100	280	170	30	35
TA1		370	250	20	35
TA2		440	320	18	35
TA3		540	410	15	30
TA9		370	250	20	30
TA10		485	345	18	25
TC4		895	825	10	25

20.3 镍及镍合金的力学性能

20.3.1 镍及镍合金板材的力学性能（表 20-13）

表 20-13 镍及镍合金板材的力学性能（GB/T 2054—2005）

牌号	交货 状态	厚度 /mm	抗拉强度 $R_m$ / (N/mm <sup>2</sup> ) ≥	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 $A_{50mm}$ 或 $A_{11.3}$ (%) ≥	硬度	
						HV	HRB
N4、N5 NW4-0.15 NW4-0.1 NW4-0.07	M	≤1.5	350	85	35	—	—
		>1.5	350	85	40	—	—
	R	>4	350	85	30	—	—
	Y	≤2.5	490	—	2	—	—
N6、N7、DN NSi0.19、 NMg0.1	M	≤1.5	380	105	35	—	—
		>1.5	380	105	40	—	—
	R	>4	380	130	30	—	—
	Y	>1.5	620	480	2	188~215	90~95
		≤1.5	540	—	2	—	—
	Y <sub>2</sub>	>1.5	490	290	20	147~170	79~85
NCu28-2.5-1.5	M	—	440	160	25	—	—
	R	>4	440	—	25	—	—
	Y <sub>2</sub>	—	570	—	6.5	157~188	82~90
NCu30	M	—	480	195	30	—	—
	R	>4	510	275	25	—	—
	Y <sub>2</sub>	—	550	300	25	157~188	82~90

20.3.2 镍及镍合金带材的力学性能（表 20-14）

表 20-14 镍及镍合金带材的力学性能（GB/T 2072—2007）

牌 号	产品厚度 /mm	状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)	
					$A_{11.3}$	$A_{50mm}$
N4, NW4-0.15 NW4-0.1, NW4-0.07	0.25~1.2	软态 (M)	≥345	—	≥30	—
		硬态 (Y)	≥490	—	≥2	—

(续)

牌 号	产品厚度 /mm	状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 (%)	
					$A_{11.3}$	$A_{50mm}$
N5	0.25 ~ 1.2	软态 (M)	≥350	≥85	—	≥35
N7	0.25 ~ 1.2	软态 (M)	≥380	≥105	—	≥35
		硬态 (Y)	≥620	≥480	—	≥2
N6, DN, NMg0.1 NSi0.19	0.25 ~ 1.2	软态 (M)	≥392	—	≥30	—
		硬态 (Y)	≥539	—	≥2	—
NCu28-2.5-1.5	0.5 ~ 1.2	软态 (M)	≥441	—	≥25	—
		半硬态 (Y <sub>2</sub> )	≥568	—	≥6.5	—
NCu30	0.25 ~ 1.2	软态 (M)	≥480	≥195	≥25	—
		半硬态 (Y <sub>2</sub> )	≥550	≥300	≥25	—
		硬态 (Y)	≥680	≥620	≥2	—
NCu40-2-1	0.25 ~ 1.2	软态 (M) 半硬态 (Y <sub>2</sub> ) 硬态 (Y)	报实测	—	报实测	—

20.3.3 压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 (表 20-15)

表 20-15 压力容器用镍铜合金无缝管的力学性能 (JB 4742—2000)

状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A$ (%)
退火	≥460	≥195	≥35

20.3.4 镍及镍合金管材的力学性能 (表 20-16)

表 20-16 镍及镍合金管材的力学性能 (GB/T 2882—2005)

牌 号	壁厚/mm	状态	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> ) ≥	断后伸长率 (%) ≥	
				$A$	$A_{50mm}$
N2、N4、DN	所有规格	M	390	35	—
		Y	540	—	—
N6	<0.9	M	390	—	35
		Y	540	—	—
	≥0.9	M	370	35	—
		Y <sub>2</sub>	450	—	12
		Y	520	6	—

(续)

牌 号	壁厚/mm	状态	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2) \geq$	断后伸长率 (%) $\geq$	
				$A$	$A_{50mm}$
NCu28-2.5-1.5	所有规格	M	440	—	20
NCu40-2-1		Y <sub>2</sub>	540	6	—
NSi0.19		Y	585	3	—
NMg0.1					

20.3.5  镍及镍合金棒材的力学性能（表 20-17）

表 20-17  镍及镍合金棒材的力学性能（GB/T 4435—1984）

合金牌号	状态	直径/mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{11.3} (%)$
			$\geq$	
N6	拉制、硬 (Y)	5 ~ 20	588	5
		> 20 ~ 30	539	6
		> 30 ~ 40	510	6
N6	拉制、软 (M)	5 ~ 30	392	30
		> 30 ~ 40	343	30
	挤制 (R)	32 ~ 50	343	25
		> 50 ~ 60	343	20
NCu28-2.5-1.5	拉制、硬 (Y)	5 ~ 15	664	4
		> 15 ~ 30	637	6
		> 30 ~ 40	588	6
	拉制、半硬 (Y <sub>2</sub> )	5 ~ 20	588	10
		> 20 ~ 30	539	12
	拉制、软 (M)	5 ~ 30	441	20
		> 30 ~ 40	441	20
	挤制 (R)	32 ~ 60	392	25

20.3.6  镍及镍合金焊条熔敷金属的力学性能（表 20-18）

表 20-18  镍及镍合金焊条熔敷金属的力学性能（GB/T 13814—2008）

焊条型号	化学成分代号	下屈服强度 $R_{eL}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 A (%)
		≥		
镍				
ENi2061	NiTi3	200	410	18
ENi2061A	NiNbTi			



(续)

焊条型号	化学成分代号	下屈服强度 $R_{eL}$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$	$A (%)$
$\geq$				
镍铜				
ENi4060	NiCu30Mn3Ti	200	480	27
ENi4061	NiCu27Mn3NbTi			
镍铬				
ENi6082	NiCr20Mn3Nb	360	600	22
ENi6231	NiCr22W14Mo	350	620	18
镍铬铁				
ENi6025	NiCr25Fe10AlY	400	690	12
ENi6062	NiCr15Fe8Nb	360	550	27
ENi6093	NiCr15Fe8NbMo	360	650	18
ENi6094	NiCr14Fe4NbMo			
ENi6095	NiCr15Fe8NbMoW			
ENi6133	NiCr16Fe12NbMo	360	550	27
ENi6152	NiCr30Fe9Nb			
ENi6182	NiCr15Fe6Mn			
ENi6333	NiCr25Fe16CoNbW	360	550	18
ENi6701	NiCr36Fe7Nb	450	650	8
ENi6702	NiCr28Fe6W			
ENi6704	NiCr25Fe10Al3YC	400	690	12
ENi8025	NiCr29Fe30Mo	240	550	22
ENi8165	NiCr25Fe30Mo			
镍钼				
ENi1001	NiMo28Fe5	400	690	22
ENi1004	NiMo25Cr5Fe5			
ENi1008	NiMo19WCr	360	650	22
ENi1009	NiMo20WCu			
ENi1062	NiMo24Cr8Fe6	360	550	18
ENi1066	NiMo28	400	690	22
ENi1067	NiMo30Cr	350	690	22
ENi1069	NiMo28Fe4Cr	360	550	20

(续)

焊条型号	化学成分代号	下屈服强度 $R_{eL}$	抗拉强度 $R_m$	断后伸长率
		$/(N/mm^2)$	$/(N/mm^2)$	$A (%)$
$\geq$				
镍铬钼				
ENi6002	NiCr22Fe18Mo	380	650	18
ENi6012	NiCr22Mo9	410	650	22
ENi6022	NiCr21Mo13W3	350	690	22
ENi6024	NiCr26Mo14			
ENi6030	NiCr29Mo5Fe15W2	350	585	22
ENi6059	NiCr23Mo16	350	690	22
ENi6200	NiCr23Mo16Cu2	400	690	22
ENi6275	NiCr15Mo16Fe5W3			
ENi6276	NiCr15Mo15Fe6W4			
ENi6205	NiCr25Mo16	350	690	22
ENi6452	NiCr19Mo15			
ENi6455	NiCr16Mo15Ti	300	690	22
ENi6620	NiCr14Mo7Fe	350	620	32
ENi6625	NiCr22Mo9Nb	420	760	27
ENi6627	NiCr21MoFeNb	400	650	32
ENi6650	NiCr20Fe14Mo11WN	420	660	30
ENi6686	NiCr21Mo16W4	350	690	27
ENi6985	NiCr22Mo7Fe19	350	620	22
镍铬钴钼				
ENi6117	NiCr22Co12Mo	400	620	22

20.3.7 镍及镍合金线的力学性能（表 20-19）

表 20-19 镍及镍合金线的力学性能（GB/T 21653—2008）

牌 号	状态	直径（对边距） /mm	抗拉强度 $R_m$ /(N/mm <sup>2</sup> )	断后伸长率 $A_{100mm}$ (%) ≥
N6、N8	Y <sub>2</sub>	0.10 ~ 0.50	780 ~ 980	—
		>0.50 ~ 1.00	685 ~ 835	—
		>1.00 ~ 10.00	540 ~ 685	—

(续)

牌 号	状态	直径 (对边距) /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%) \geq$
N6、N8	M	0.03 ~ 0.20	$\geq 420$	15
		>0.20 ~ 0.50	$\geq 390$	20
		>0.50 ~ 1.00	$\geq 370$	20
		>1.00 ~ 10.00	$\geq 340$	25
N5	M	>0.30 ~ 0.45	$\geq 340$	20
		>0.45 ~ 10.0	$\geq 340$	25
N7	Y	>0.03 ~ 3.20	$\geq 540$	—
		>3.20 ~ 10.0	$\geq 460$	—
	M	>0.30 ~ 0.45	$\geq 380$	20
		>0.45 ~ 10.0	$\geq 380$	25
NCu28-2.5-1.5、 NCu30	Y	0.05 ~ 3.20	$\geq 770$	—
		>3.20 ~ 10.0	$\geq 690$	—
	M	0.05 ~ 0.45	$\geq 480$	20
		>0.45 ~ 10.0	$\geq 480$	25
NCu40-2-1	Y	0.1 ~ 10.0	$\geq 635$	—
	M	0.1 ~ 1.0	$\geq 440$	10
		>1.0 ~ 5.0	$\geq 440$	15
		>5.0 ~ 10.00	$\geq 390$	25
NMn3 <sup>①</sup>	Y	0.5 ~ 6.0	$\geq 685$	—
	M		$\leq 640$	20
NMn5 <sup>①</sup>	Y	0.5 ~ 6.0	$\geq 735$	—
	M		$\leq 735$	18
NCu30-3-0.5	CYS <sup>②</sup>	0.5 ~ 7.0	$\geq 900$	—
NMg0.1、NSi0.19、 NSi3、DN	Y	0.03 ~ 0.09	880 ~ 1325	—
		>0.09 ~ 0.50	830 ~ 1080	—
		>0.50 ~ 1.00	735 ~ 980	—
		>1.00 ~ 6.00	640 ~ 885	—
		>6.00 ~ 10.00	585 ~ 835	—
	Y <sub>2</sub>	0.10 ~ 0.50	780 ~ 980	—
		>0.50 ~ 1.00	685 ~ 835	—
		>1.00 ~ 10.00	540 ~ 685	—

(续)

牌 号	状态	直径 (对边距) /mm	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$	断后伸长率 $A_{100mm}(\%) \geq$
NMg0.1、NSi0.19、 NSi3、DN	M	0.03 ~ 0.20	$\geq 420$	15
		> 0.20 ~ 0.50	$\geq 390$	20
		> 0.50 ~ 1.00	$\geq 370$	20
		> 1.00 ~ 10.00	$\geq 340$	25

- ① 用于火花塞的镍锰合金线材的抗拉强度应在 735 ~ 935N/mm<sup>2</sup> 之间。
- ② 推荐的固溶处理为最低温度 980℃，水淬火。稳定化和沉淀热处理为 590 ~ 610℃，8 ~ 16h，冷却速率为 8 ~ 15℃/h，炉冷至 480℃，空冷。另一种方法是，炉冷至 535℃，在 535℃ 保温 6h，炉冷至 480℃，保温 8h，空冷。

20.3.8 电池用泡沫镍的室温力学性能 (表 20-20)

表 20-20 电池用泡沫镍的室温力学性能 (GB/T 20251—2006)

项目	抗拉强度 $R_m/(N/mm^2)$		断后伸长率 $A(\%)$		柔 韧 性			
					不断裂次数/次			
	纵向	横向	纵向	横向	纵 向		横 向	
指标	$\geq 1.25$	$\geq 0.90$	$\geq 5.0$	$\geq 10.0$	厚度 $\leq 1.6mm$		$\geq 7$	$\geq 15$
					1.6mm < 厚度 $\leq 1.8mm$		$\geq 6$	
					1.8mm < 厚度 $\leq 2.0mm$		$\geq 5$	
					2.0mm < 厚度 $\leq 2.5mm$		$\geq 4$	



# 附 录

## 附录 A 金属材料力学性能测试标准代号及名称

金属材料拉伸性能测试标准代号及名称如表 A-1 所示。金属材料硬度测试标准代号及名称如表 A-2 所示。金属材料冲击性能测试标准代号及名称如表 A-3 所示。金属材料扭转性能测试标准代号及名称如表 A-4 所示。金属材料压缩性能测试标准代号及名称如表 A-5 所示。金属材料弯曲性能测试标准代号及名称如表 A-6 所示。金属材料剪切性能测试标准代号及名称如表 A-7 所示。金属材料断裂韧度测试标准代号及名称如表 A-8 所示。金属材料高温长时性能测试标准代号及名称如表 A-9 所示。金属材料疲劳性能测试标准代号及名称如表 A-10 所示。

表 A-1 金属材料拉伸性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 228—2002	金属材料 室温拉伸试验方法
GB/T 2039—1997	金属拉伸蠕变及持久试验方法
GB/T 2651—2008	焊接接头拉伸试验方法
GB/T 2652—2008	焊缝及熔敷金属拉伸试验方法
GB/T 4338—2006	金属材料高温拉伸试验方法
GB/T 5028—2008	金属材料 薄板和薄带 拉伸应变硬化指数（n 值）的测定
GB/T 8358—2006	钢丝绳破断拉伸试验方法
GB/T 10573—1989	有色金属细丝拉伸试验方法
GB/T 13239—2006	金属材料低温拉伸试验方法
GB/T 16865—1997	变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样
GB/T 17600.1—1998	钢的伸长率换算 第 1 部分：碳素钢和低合金钢
GB/T 17600.2—1998	钢的伸长率换算 第 1 部分：奥氏体钢
GB/T 22315—2008	金属材料 弹性模量和泊松比试验方法
GB/T 24172—2009	金属超塑性材料拉伸性能测定方法
GB/T 24584—2009	金属材料 拉伸试验 液氮试验方法
SJ 2425—1983	金属细丝拉伸试验方法
YB/T 5361—2006	金属管 管环拉伸试验方法

表 A-2 金属材料硬度测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 230.1—2009	金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T标尺）
GB/T 230.2—2002	金属洛氏硬度试验 第2部分：硬度计（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T标尺）的检验与校准
GB/T 230.3—2002	金属洛氏硬度试验 第3部分：标准硬度块（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T标尺）的标定
GB/T 231.1—2009	金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB/T 231.2—2002	金属布氏硬度试验 第2部分：硬度计的检验与校准
GB/T 231.3—2002	金属布氏硬度试验 第3部分：标准硬度块的标定
GB/T 231.4—2009	金属材料 布氏硬度试验 第4部分：硬度值表
GB/T 1172—1999	黑色金属硬度及强度换算值
GB/T 2654—2008	焊接接头硬度试验方法
GB/T 3771—1983	铜合金硬度与强度换算值
GB/T 4340.1—2009	金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB/T 4340.2—1999	金属维氏硬度试验 第2部分：硬度计的检验
GB/T 4340.3—1999	金属维氏硬度试验 第3部分：标准硬度块的标定
GB/T 4340.4—2009	金属材料 维氏硬度试验 第4部分：硬度值表
GB/T 4341—2001	金属肖氏硬度试验方法
GB/T 17394—1998	金属里氏硬度试验方法
GB/T 18449.1—2009	金属材料 努氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB/T 18449.2—2001	金属努氏硬度试验 第2部分：硬度计的检验
GB/T 18449.3—2001	金属努氏硬度试验 第3部分：标准硬度块的标定
GB/T 18449.4—2009	金属材料 努氏硬度试验 第4部分：硬度值表
GB/T 24523—2009	金属材料快速压痕（布氏）硬度试验方法
JB/T 6050—2006	钢铁热处理零件硬度检验通则
SJ 1279—1977	金属镀层硬度的检验方法
SN/T 2082—2008	冷轧薄钢板洛氏硬度试验方法
YS/T 420—2000	铝合金维氏硬度试验方法
YS/T 471—2004	铜及铜合金维氏硬度试验方法
YS/T 541—2006	金属热喷涂层表面洛氏硬度试验方法

表 A-3 金属材料冲击性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 229—2007	金属材料夏比摆锤冲击试验方法
GB/T 2650—2008	焊接接头冲击试验方法
GB/T 12778—2008	金属夏比冲击断口测定方法
GB/T 18658—2002	摆锤式冲击试验机检验用夏比 V 型缺口标准试样
GB/T 19748—2005	钢材 夏比 V 型缺口摆锤冲击试验仪器化试验方法

表 A-4 金属材料扭转性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 239—1999	金属线材扭转试验方法
GB/T 10128—2007	金属材料 室温扭转试验方法
YB/T 4176—2008	金属材料 大规格线材扭转试验方法

表 A-5 金属材料压缩性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 3251—2006	铝及铝合金管材压缩试验方法
GB/T 6525—1986	烧结金属材料室温压缩强度的测定
GB/T 7314—2005	金属材料 室温压缩试验方法

表 A-6 金属材料弯曲性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 232—1999	金属材料 弯曲试验方法
GB/T 235—1999	金属材料 厚度等于或小于 3mm 薄板和薄带 反复弯曲试验方法
GB/T 238—2002	金属材料 线材 反复弯曲试验方法
GB/T 244—2008	金属管 弯曲试验方法
GB/T 2653—2008	焊接接头弯曲试验方法
GB/T 8364—2008	热双金属热弯曲试验方法
GB/T 12347—2008	钢丝绳弯曲疲劳试验方法
GB/T 14230—1993	齿轮弯曲疲劳强度试验方法
GB/T 14235. 2—1993	熔模铸造模料 抗弯强度测定方法
GB/T 15825. 5—2008	金属薄板成形性能与试验方法 第 5 部分：弯曲试验
GB/T 15970. 3—1995	金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 3 部分：U 型弯曲试样的制备和应用
GB/T 24298—2009	热双金属横向弯曲试验方法
JB/T 7131—2002	热双金属横向弯曲试验方法
YB/T 5349—2006	金属弯曲力学性能试验方法

表 A-7 金属材料剪切性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 3250—2007	铝及铝合金铆钉线与铆钉剪切试验方法及铆钉线铆接试验方法
GB/T 6400—2007	金属材料 线材和铆钉剪切试验方法
GB/T 13683—1992	销 剪切试验方法

表 A-8 金属材料断裂韧性测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 4161—2007	金属材料 平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 试验方法
GB/T 7732—2008	金属材料 表面裂纹拉伸试样断裂韧性试验方法
GB/T 19744—2005	铁素体钢 平面应变止裂韧性 $K_{Is}$ 试验方法
GB/T 21143—2007	金属材料 准静态断裂韧性的统一试验方法

表 A-9 金属材料高温长时性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
HB 5150—1996	金属高温拉伸持久试验方法
HB 5151—1996	金属高温拉伸蠕变试验方法
GB/T 10120—1996	金属应力松弛试验方法
GB/T 2039—1997	金属拉伸蠕变及持久试验方法
YB/T 5350—2006	金属材料高温弹性模量测量方法 圆盘振子法

表 A-10 金属材料疲劳性能测试标准代号及名称

标准代号	标准名称
GB/T 3075—2008	金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
GB/T 4337—2008	金属材料 疲劳试验 旋转弯曲方法
GB/T 6398—2000	金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法
GB/T 12347—2008	钢丝绳弯曲疲劳试验方法
GB/T 12443—2007	金属材料 扭应力疲劳试验方法
GB/T 13682—1992	螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验方法
GB/T 14229—1993	齿轮接触疲劳强度试验方法
GB/T 14230—1993	齿轮弯曲疲劳强度试验方法
GB/T 15248—2008	金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法
GB/T 15824—2008	热作模具钢热疲劳试验方法
GB/T 20120.1—2006	金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第1部分：循环失效试验
GB/T 20120.2—2006	金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第2部分：预裂纹试样裂纹扩展试验
GB/T 24176—2009	金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法
YB/T 5345—2006	金属材料滚动接触疲劳试验方法



附录 B 金属材料力学性能试验相关符号及说明

金属材料室温拉伸试验相关符号及说明如表 B-1 所示。金属材料拉伸应变硬化指数试验相关符号及说明如表 B-2 所示。金属材料布氏硬度试验相关符号及说明如 B-3 所示。金属材料维氏硬度试验相关符号及说明如表 B-4 所示。金属材料努氏硬度试验相关符号及说明如表 B-5 所示。金属材料里氏硬度试验相关符号及说明如表 B-6 所示。焊接接头硬度试验相关符号及说明如表 B-7 所示。金属材料夏比摆锤冲击试验相关符号及说明如表 B-8 所示。金属材料夏比 V 形缺口摆锤冲击试验相关符号及说明如表 B-9 所示。金属材料圆柱形试样和管形试样扭转试验相关符号及说明如表 B-10 所示。金属材料线材试样扭转试验相关符号及说明如表 B-11 所示。金属材料压缩试验相关符号及说明如表 B-12 所示。金属材料线材反复弯曲试验相关符号及说明如表 B-13 所示。金属材料剪切性能测定相关符号及说明如表 B-14 所示。金属材料平面应变裂纹止裂断裂韧度试验相关符号及说明如表 B-15 所示。金属材料平面应变断裂韧度试验相关符号及说明如表 B-16 所示。金属材料表面裂纹拉伸断裂韧度试验相关符号及说明如表 B-17 所示。金属材料拉伸蠕变及持久试验相关符号及说明如表 B-18 所示。金属材料应力松弛试验相关符号及说明如表 B-19 所示。金属材料疲劳裂纹扩展速率试验相关符号及说明如表 B-20 所示。金属材料轴向等幅低循环疲劳试验相关符号及说明如表 B-21 所示。

表 B-1 金属材料室温拉伸试验相关符号及说明（GB/T 228—2002）

符号	说 明	符号	说 明
$a$	矩形横截面试样厚度或者管壁厚度，单位为 mm	$L_e$	引伸计标距，单位为 mm
		$L_t$	试样总长度，单位为 mm
$a_0$	矩形横截面试样断裂后缩颈处最小厚度，单位为 mm	$r$	过渡弧半径，单位为 mm
$b$	矩形横截面试样平行长度的宽度或者管的纵向剖条宽度或者扁丝宽度，单位为 mm	$L_u$	断后标距，单位为 mm
		$m$	质量，单位为 g
$b_0$	矩形横截面试样断裂后缩颈处最大宽度，单位为 mm	$\rho$	密度，单位为 g/cm <sup>3</sup>
$d$	圆形横截面试样平行长度的直径或圆丝直径，单位为 mm	$S_0$	原始横截面积，单位为 mm <sup>2</sup>
		$S_u$	断后最小横截面积，单位为 mm <sup>2</sup>
$d_0$	圆形横截面试样断裂后缩颈处最小直径，单位为 mm	$k$	比例系数
$D$	管外径，单位为 mm	$Z$	断面收缩率（%）
$L_0$	原始标距，单位为 mm	$\Delta L_m$	最大力（ $F_m$ ）总延伸，单位为 mm
$L_e$	平行长度，单位为 mm	$A$	断后伸长率（%）
		$A_1$	断后总伸长率（%）
		$A_e$	屈服点延伸率（%）
		$A_g$	最大力（ $F_m$ ）非比例伸长率（%）

(续)

符号	说 明	符号	说 明
$A_g$	最大力 ( $F_m$ ) 总伸长率 (%)	$R_{eL}$	下屈服强度, 单位为 $N/mm^2$
$\varepsilon_p$	规定非比例延伸率 (%)	$R_p$	规定非比例延伸强度, 单位为 $N/mm^2$
$\varepsilon_t$	规定总延伸率 (%)	$R_t$	规定总延伸强度, 单位为 $N/mm^2$
$\varepsilon_r$	规定残余延伸率 (%)	$R_r$	规定残余延伸强度, 单位为 $N/mm^2$
$F_m$	最大力, 单位为 N	$R_m$	抗拉强度, 单位为 $N/mm^2$
$R_{eH}$	上屈服强度, 单位为 $N/mm^2$	$E$	弹性模量, 单位为 $N/mm^2$

表 B-2 金属材料拉伸应变硬化指数试验相关符号及说明 (GB/T 5028—2008)

符 号	说 明
$L_e$	引伸计标距, 单位为 mm
$\Delta L$	引伸计标距部分的瞬时延伸, 单位为 mm
$L$	引伸计标距部分的瞬时长度 $L = L_e + \Delta L$ , 单位为 mm
$e_p$	测定拉伸应变硬化指数的约定塑性应变水平 (%)
$S_0$	试样平行长度部分的原始横截面积, 单位为 $mm^2$
$S$	真实横截面积, 单位为 $mm^2$
$F$	施加于试样上的瞬时力, 单位为 N
$R$	应力, 单位为 $N/mm^2$
$S$	真实应力, 单位为 $N/mm^2$
$e$	真实塑性应变
$m_E$	应力-应变曲线弹性部分的斜率, 单位为 $N/mm^2$
$n$	拉伸应变硬化指数
$C$	强度系数, 单位为 $N/mm^2$
$r$	塑性应变比
$R_m$	抗拉强度, 单位为 $N/mm^2$
$A_e$	屈服点延伸率 (%)
$A_g$	最大力塑性延伸率 (%)
$A, B, x, y$	采用人工方式测定 $n$ 值的几个变量

表 B-3 金属材料布氏硬度试验相关符号及说明 (GB/T 231.1—2002)

符 号	说 明
$D$	球直径, 单位为 mm
$F$	试验力, 单位为 N
$d$	压痕平均直径, 单位为 mm, $d = (d_1 + d_2)/2$
$d_1, d_2$	在两相互垂直方向测量的压痕直径, 单位为 mm
$h$	压痕深度, 单位为 mm, $h = (D - \sqrt{D^2 - d^2})/2$
HBW	布氏硬度符号
$0.102F/D^2$	试验力-球直径平方的比率

表 B-4 金属材料维氏硬度试验相关符号及说明 (GB/T 4340.1—2009)

符 号	说 明
$\alpha$	金刚石压头顶部两相对面夹角 (136°)
$F$	试验力, 单位为 N
$d$	两压痕对角线长度 $d_1$ 和 $d_2$ 的算术平均值, 单位为 mm
HV	维氏硬度符号

表 B-5 金属材料努氏硬度试验相关符号及说明 (GB/T 18449.1—2009)

符 号	说 明	符 号	说 明
$F$	试验力, 单位为 N	$\alpha、\beta$	相对棱边之间的夹角, 单位为 (°)
$d$	两压痕长对角线长度, 单位为 mm	HK	努氏硬度符号

表 B-6 金属材料里氏硬度试验相关符号及说明 (GB/T 17394—1998)

符 号	说 明	符 号	说 明
HLD	用 D 型冲击装置测定的里氏硬度	HLG	用 G 型冲击装置测定的里氏硬度
HLDC	用 DC 型冲击装置测定的里氏硬度	HLC	用 C 型冲击装置测定的里氏硬度

表 B-7 焊接接头硬度试验相关符号及说明 (GB/T 2654—2008)

符 号	说 明
$E$	单点测定
$R$	标线测定
$L$	在热影响区两个相邻测点中心的距离, 单位为 mm
$H$	标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离, 单位为 mm
$t$	试样的厚度, 单位为 mm

表 B-8 金属材料夏比摆锤冲击试验相关符号及说明 (GB/T 229—2007)

符 号	名 称
$K_p$	实际初始势能, 单位为 J
$FA$	剪切断面率 (%)
$h$	试样高度, 单位为 mm
$KU_2$	U 形缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量, 单位为 J
$KU_8$	U 形缺口试样在 8mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量, 单位为 J
$KV_2$	V 形缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量, 单位为 J
$KV_8$	V 形缺口试样在 8mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量, 单位为 J
$LE$	侧膨胀值, 单位为 mm
$l$	试样长度, 单位为 mm
$T_t$	转变温度, 单位为 °C
$w$	试样宽度, 单位为 mm

表 B-9 金属材料夏比 V 形缺口摆锤冲击试验相关符号及说明 (GB/T 19748—2005)

符号	名 称	符号	名 称
$f_g$	输入频率, 单位为 Hz	$s_a$	不稳定裂纹扩展终止位移, 单位为 mm
$F$	力, 单位为 N	$s_m$	最大力时的位移, 单位为 mm
$F_{gy}$	屈服力, 单位为 N	$s_t$	总位移, 单位为 mm
$F_{iu}$	不稳定裂纹扩展起始力, 单位为 N	$t$	时间, 单位为 s
$F_a$	不稳定裂纹扩展终止力, 单位为 N	$t_0$	试样开始变形的时间, 单位为 s
$F_m$	最大力, 单位为 N	$t_r$	信号上升的时间, 单位为 s
$g_n$	重力加速度, 单位为 $m/s^2$	$V_0$	冲击开始时的冲击速度, 单位为 m/s
$h$	摆锤打击中心下落高度, 单位为 m	$V_t$	在 t 时刻的冲击速度, 单位为 m/s
$A_K$	冲击吸收功, 单位为 J	$W_m$	最大力时的能量, 单位为 J
$m$	摆锤质量, 单位为 kg	$W_{iu}$	不稳定裂纹扩展起始位能量, 单位为 J
$s$	位移, 单位为 mm	$W_a$	不稳定裂纹扩展起终止能量, 单位为 J
$s_{gy}$	屈服位移, 单位为 mm	$W_t$	总冲击能量, 单位为 J
$s_{iu}$	不稳定裂纹扩展起始位移, 单位为 mm		

表 B-10 金属材料试验圆柱形试样和管形试样扭转  
试验相关符号及说明 (GB/T 10128—2007)

符号	说 明	符号	说 明
$\alpha$	管形试样平行长度部分的管壁厚度, 单位为 mm	$\Delta T$	扭矩增量, 单位为 $N \cdot mm$
		$\Phi$	扭角, 单位为 ( $^{\circ}$ )
$d$	圆柱形试样和管形试样平行长度部分的外直径, 单位为 mm	$\Phi_{max}$	最大非比例扭角, 单位为 ( $^{\circ}$ )
		$\Delta \Phi$	扭角增量, 单位为 ( $^{\circ}$ )
$L_c$	试样平行长度, 单位为 mm	$I_p$	极惯性矩, 单位为 $mm^4$
$L_0$	试样标距, 单位为 mm	$W$	截面系数, 单位为 $mm^3$
$L_e$	扭转计标距, 单位为 mm	$G$	剪切模量, 单位为 $N/mm^2$
$L$	试样总长度, 单位为 mm	$\tau_p$	规定非比例扭转强度, 单位为 $N/mm^2$
$R$	试样头部过渡半径, 单位为 mm	$\tau_{eH}$	上屈服强度, 单位为 $N/mm^2$
$T$	扭矩, 单位为 $N \cdot mm$	$\tau_{eL}$	下屈服强度, 单位为 $N/mm^2$
$T_p$	规定非比例扭矩, 单位为 $N \cdot mm$	$\tau_m$	抗扭强度, 单位为 $N/mm^2$
$T_{eH}$	上屈服扭矩, 单位为 $N \cdot mm$	$\gamma_p$	非比例切应变 ( $\%$ )
$T_{eL}$	下屈服扭矩, 单位为 $N \cdot mm$	$\gamma_{max}$	最大非比例切应变 ( $\%$ )
$T_m$	最大扭矩, 单位为 $N \cdot mm$		

表 B-11 金属材料扭转试验线材试样相关符号及说明 (YB/T 4176—2008)

符号	说 明	符号	说 明
$d$	圆形横截面金属线材直径, 单位为 mm	$r$	夹头扭转速度, 单位为 r/min
$D$	非圆形横截面金属线材特征尺寸, 单位为 mm	$N_1$	单向扭转次数
$L$	两夹头之间的标距长度, 单位为 mm	$N_1, N_2$	双向扭转次数

表 B-12 金属材料压缩试验相关符号及说明 (GB/T 7314—2005)

符 号	说 明
$a$	试样原始厚度, 单位为 mm
$b$	试样原始宽度, 单位为 mm
$d$	试样原始直径, 单位为 mm
$L$	试样长度, 单位为 mm
$L_0$	试样原始标距, 单位为 mm
$H$	约束装置的高度, 单位为 mm
$h$	板材试样无约束部分的长度, 单位为 mm
$S_0$	试样原始横截面积, 单位为 $\text{mm}^2$
$\Delta L$	原始标距段受力后的变形, 单位为 mm
$\varepsilon_{\text{pc}}$	规定非比例压缩应变 (%)
$\varepsilon_{\text{tc}}$	规定总压缩应变 (%)
$n$	变形放大倍数
$F_0$	试样上端所受的力, 单位为 N
$F$	实际压缩力, 单位为 N; 无侧向约束的实验, $F = F_0$
$F_f$	摩擦力, 单位为 N
$F_{\text{pc}}$	规定非比例压缩变形的实际压缩力, 单位为 N
$F_{\text{tc}}$	规定总压缩变形的实际压缩力, 单位为 N
$F_{\text{eHc}}$	屈服时的实际上屈服压缩力, 单位为 N
$F_{\text{eLc}}$	屈服时的实际下屈服压缩力, 单位为 N
$F_{\text{mc}}$	对于脆性材料, 试样压至破坏过程中的最大实际压缩力; 对于塑性材料, 指规定应变条件下的压缩力。单位为 N
$R_{\text{pc}}$	规定非比例压缩强度, 单位为 $\text{N/mm}^2$
$R_{\text{tc}}$	规定总压缩强度, 单位为 $\text{N/mm}^2$
$R_{\text{eHc}}$	上压缩屈服强度, 单位为 $\text{N/mm}^2$
$R_{\text{eLc}}$	下压缩屈服强度, 单位为 $\text{N/mm}^2$
$R_{\text{mc}}$	脆性材料的抗压强度或塑性材料的规定应变条件下的压缩应力, 单位为 $\text{N/mm}^2$
$E_c$	压缩弹性模量, 单位为 $\text{N/mm}^2$

表 B-13 金属材料线材反复弯曲试验相关符号及说明 (GB/T 238—2002)

符 号	说 明
$d$	圆金属线材直径, 单位为 mm
$a$	装在两平行夹具间的非圆截面试样最小厚度, 单位为 mm
$r$	圆柱支座半径, 单位为 mm
$h$	圆柱支座顶部至拨杆底部距离, 单位为 mm
$d_g$	拨杆孔直径, 单位为 mm
$y$	两圆柱支座轴线所在平面与试样最近接触点的距离, 单位为 mm
$N_b$	反复弯曲次数, 单位为次

表 B-14 金属材料剪切性能测定相关符号及说明 (GB/T 6400—2007)

符 号	说 明
$d$	试样直径, 单位为 mm
$S_0$	试样原始横截面积 $S_0 = \pi d^2/4$ , 单位为 $\text{mm}^2$
$t$	试验温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$
$F_m$	剪切试验中的最大试验力, 单位为 N
$\tau_b$	抗剪强度, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$
$\tau_{b,t}$	试验温度下的抗剪强度, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$

表 B-15 金属材料平面应变裂纹止裂断裂韧性试验  
相关符号及说明 (GB/T19744—2005)

符 号	说 明	符 号	说 明
$a_0$	试样缺口长度, 单位为 mm	$V$	位移, 单位为 mm
$a$	止裂裂纹长度, 单位为 mm	$V_0$	起始位移, 单位为 mm
$a_t$	平均止裂裂纹长度, 单位为 mm	$V_a$	止裂位移, 单位为 mm
$W_N$	缺口宽度, 单位为 mm	$V_{F1}$	第一次加载循环位移偏量, 单位为 mm
$\rho$	缺口根部直径, 单位为 mm	$V_{F_n-1}$	总积累位移偏量, 单位为 mm
$r$	侧槽底部直径, 单位为 mm	$K$	应力强度因子, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$
$B$	试样厚度, 单位为 mm	$F_{\max}$	最大力, 单位为 N
$B_N$	试样净厚度 (裂纹平面), 单位为 mm	$K_0$	裂纹启裂应力强度因子, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$
$W$	试样宽度, 单位为 mm	$K_a$	裂纹止裂断裂韧性, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$
$H$	试样的半高度, 单位为 mm	$K_{Qa}$	平面应变止裂断裂韧性条件值, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$
$L$	试样加载中心孔距试样前端的距离, 单位为 mm	$K_{Ia}$	平面应变裂纹止裂断裂韧性, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$
$E$	杨氏模量, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$	$T$	试验温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$
$R_{YD}$	动态屈服强度, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$		
$R_{YS}$	静态屈服强度, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$		
$n$	加载/卸载次数, 单位为周次		

表 B-16 金属材料平面应变断裂韧性试验相关符号及说明 (GB/T 4161—2007)

符 号	说 明
$a$	裂纹长度, 单位为 mm
$B$	试样厚度, 单位为 mm
$E$	杨氏模量, 单位为 $\text{N}/\text{mm}^2$
$F$	施加的力, 单位为 N
$F_Q$	特定的力值, 单位为 N
$F_s$	特定的力值, 单位为 N



(续)

符 号	说 明
$K_A$	动态裂纹止裂断裂韧度, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_a$	静态裂纹止裂断裂韧度, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_{Ia}$	平面应变裂纹止裂断裂韧度, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_f$	预制疲劳裂纹时的最大应力强度因子, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_I$	张开型应力强度因子, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_{IC}$	$K_I$ 的临界值 (平面应变断裂韧度), 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_Q$	$K_{IC}$ 的条件值, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$R$	预制疲劳裂纹时任一循环的最小力与最大力之比
$R_{p0.2}$	规定非比例延伸强度, 单位为 $N/mm^2$
$S$	弯曲试样跨距, 单位为 mm
$V$	缺口张开位移, 单位为 mm
$W$	弯曲试样的宽度或紧凑拉伸试样的有效宽度, 单位为 mm
$\Delta K_I$	预制疲劳裂纹时任一裂纹的最大应力强度因子与最小应力强度因子之差, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$

表 B-17 金属材料表面裂纹拉伸断裂韧度试验相关符号及说明 (GB/T 7732—2008)

符 号	说 明
$B$	试样厚度, 单位为 mm
$W$	试样宽度, 单位为 mm
$L$	试样测试部分长度, 单位为 mm
$a$	裂纹深度, 单位为 mm
$a_0$	加工裂纹源深度, 单位为 mm
$2c$	裂纹长度, 单位为 mm
$2c_0$	加工裂纹源长度, 单位为 mm
$B - a$	试样韧带尺寸, 单位为 mm
$K_I$	I 型应力强度因子, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_{IQ}$	表面裂纹拉伸试样的条件断裂韧度, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$K_{IC}$	表面裂纹拉伸试样的断裂韧度, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$
$M$	试样前后表面总的修正系数
$F_0$	条件力, 单位为 N
$F_{max}$	最大拉伸力, 单位为 N
$F_{fmax}$	疲劳预制裂纹时, 循环力的最大值, 单位为 N
$F_{fmin}$	疲劳预制裂纹时循环力的最小值, 单位为 N
$V$	表面裂纹试样中心处的裂纹嘴张开位移, 单位为 mm
$\sigma_r$	剩余强度, 单位为 $N/mm^2$
$K_{max}$	疲劳预制裂纹过程中最大应力强度因子, 单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$

表 B-18 金属材料拉伸蠕变及持久试验相关符号及说明 (GB/T 2039—1997)

符 号	说 明	符 号	说 明
$d_0$	圆形横截面试样原始直径, 单位为 mm	$\sigma$	试验应力 ( $\sigma = F/S$ ), 单位为 $N/mm^2$
$d_u$	圆形光滑试样断后最小直径, 单位为 mm	$\sigma'$	缺口试样试验应力, 单位为 $N/mm^2$
$a$	矩形横截面试样厚度, 单位为 mm	$t$	试验温度, 单位为 $^{\circ}C$
$b$	矩形横截面试样宽度, 单位为 mm	$\tau$	试验时间, 单位为 h
$L_0$	试样原始计算长度, 单位为 mm	$\tau'$	缺口试样试验时间, 单位为 h
$L_c$	试样原始标记长度, 单位为 mm	$\epsilon_i$	蠕变起始伸长率 (%)
$L_u$	试样断后标记长度, 单位为 mm	$\epsilon_e$	蠕变弹性伸长率 (%)
$L_t$	试样总长度, 单位为 mm	$\epsilon_p$	蠕变塑性伸长率 (%)
$S_0$	试样计算长度内原始横截面积, 单位为 $mm^2$	$\delta$	持久断面伸长率 (%)
$S_u$	试样断后最小横截面积, 单位为 $mm^2$	$\psi$	持久断面收缩率 (%)
$F$	试验力, 单位为 N	$v$	稳态蠕变速率, 单位为 (%) / h
		$K_{\sigma}, K_{\tau}$	持久试样缺口敏感系数

表 B-19 金属材料应力松弛试验相关符号及说明 (GB/T 10120—1996)

符 号	说 明
$L_0$	拉伸松弛试样的标距或环状松弛试样在初始位移时的压痕间距, 单位为 mm
$L$	拉伸松弛试样长度或环状松弛试样试验前的压痕间距, 单位为 mm
$L_r$	环状松弛试样在规定试验时间取出楔形块后的压痕间距, 单位为 mm
$\Delta_0$	环状松弛试样初始位移, 单位为 mm
$S_0$	拉伸松弛试样横截面积, 单位为 $mm^2$
$A$	系数, 单位为 $mm^{-1}$
$\sigma$	应力
$\sigma_0$	初始应力
$\sigma_r$	剩余应力
$\sigma_{re}$	松弛应力
$E_t$	高温弹性模量
$F_0$	初始试验力, 单位为 N
$F_r$	剩余试验力, 单位为 N
$F_{re}$	松弛力, 单位为 N
$\tau$	试验时间, 单位为 h 或 min
$\tau_0$	零时间, 单位为 h 或 min
$\tau_h$	初始试验力保持时间, 单位为 h 或 min
$\tau_i$	试验中任一时间, 单位为 h 或 min
$v_r$	应力松弛速率, 单位为 $N/(mm^2 \cdot h)$
$R$	松弛率 (%)
$t$	温度, 单位为 $^{\circ}C$



表 B-20 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验相关符号及说明 (GB/T 6398—2000)

符 号	说 明	符 号	说 明
$da/dN$	疲劳裂纹扩展速率, 单位为 mm/周	$K$	应力强度因子, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$a$	计算裂纹长度, 单位为 mm	$K_{max}$	最大应力强度因子, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$a_0$	试样切口长度, 单位为 mm	$K_{min}$	最小应力强度因子, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$N$	循环数, 单位为周	$\Delta K$	应力强度因子范围, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$F_{max}$	最大力, 单位为 N	$\Delta K_{th}$	疲劳裂纹扩展门槛值, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$F_{min}$	最小力, 单位为 N	$K_{eff}$	有效应力强度因子范围, 单位为 $N/mm^{3/2}$
$\Delta F$	力值范围, 单位为 N	$R$	力值比
$\sigma_{p0.2}$	规定非比例伸长 (0.2%) 应力, 单位为 $N/mm^2$	$B$	试样厚度, 单位为 mm
$\sigma_{FS}$	流变强度, 单位为 $N/mm^2$	$W$	试样宽度, 单位为 mm
$E$	弹性模量, 单位为 $N/mm^2$		

表 B-21 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验相关符号及说明 (GB/T 15248—2008)

符 号	说 明
$\Delta \varepsilon_t$	总应变范围指在一次循环中, 最大和最小应变的代数差, 即: $\Delta \varepsilon_t = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$
$\Delta \varepsilon/2$	应变幅指应变范围的一半
$\varepsilon_{max}$	最大应变指在一次循环中, 应变的最大代数值。拉伸为正, 压缩为负
$\varepsilon_{min}$	最小应变指在一次循环中, 应变的最小代数值
$\Delta \varepsilon_e$	弹性应变范围等于应力范围除以弹性模量, 即: $\Delta \varepsilon_e = \Delta \sigma / E$
$\Delta \varepsilon_v$	塑性应变范围等于总应变范围与弹性应变范围之差, 即: $\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_e$
$\Delta \sigma$	循环应力范围指在一次循环中, 最大应力与最小应力的代数差, 即: $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ , 单位为 $N/mm^2$
$\Delta \sigma/2$	应力幅指应力范围的一半, 单位为 $N/mm^2$
$\sigma_{max}$	最大应力指在一次循环中, 应力的最大代数值, 单位为 $N/mm^2$
$\sigma_{min}$	最小应力指在一次循环中, 应力的最小代数值, 单位为 $N/mm^2$
$R_\sigma$	应力比, 即: $R_\sigma = \sigma_{min} / \sigma_{max}$
$R_\varepsilon$	应变比, 即: $R_\varepsilon = \varepsilon_{min} / \varepsilon_{max}$
$N_f$	失效循环数指到达失效的循环次数, 单位为周
$2N_f$	失效反向数指到达失效的反向次数, 单位为反向数
$b$	疲劳强度指数指 $\lg (\Delta \sigma/2) - \lg 2N_f$ 或 $\lg (\Delta \varepsilon_e/2) - \lg 2N_f$ 曲线的斜率
$c$	疲劳延性指数指 $\lg (\Delta \varepsilon_p/2) - \lg 2N_f$ 曲线的斜率
$\varepsilon'_f$	疲劳延性系数指 $\lg (\Delta \varepsilon_p/2) - \lg 2N_f$ 曲线上 $2N_f = 1$ 处的纵坐标截距
$\sigma'_f$	疲劳强度系数指 $\lg (\Delta \sigma/2) - \lg 2N_f$ 曲线上 $2N_f = 1$ 处的纵坐标截距 $2N_f$ , 单位为 $N/mm^2$
$K'$	循环强度系数指 $\lg (\Delta \sigma/2) - \lg (\Delta \varepsilon_p/2)$ 曲线上 $\Delta \varepsilon_p/2 = 1$ 处的纵坐标截距, 单位为 $N/mm^2$
$n'$	循环应变硬化指数指 $\lg (\Delta \sigma/2) - \lg (\Delta \varepsilon_p/2)$ 曲线的斜率
$E$	弹性模量指在弹性范围内, 应力与应变的比值, 采用单调拉伸或物理方法测得, 单位为 $N/mm^2$
$E^*$	循环弹性模量指在循环加载条件下, 按照特定要求测得的弹性范围内的应力与应变的比值, 单位为 $N/mm^2$
$E_{NT}$	拉伸卸载模量指在第 $N$ 次循环中, 从峰值拉应力卸载时测得的弹性模量, 单位为 $N/mm^2$
$E_{NC}$	压缩卸载模量指在第 $N$ 次循环中, 从谷值压应力卸载时测得的弹性模量, 单位为 $N/mm^2$

**附录 C 拉伸性能指标名称和符号新旧对照**  
**(GB/T 228—2002 《金属材料 室温拉伸试验方法》)**

新 标 准		旧 标 准	
性能名称	符 号	性能名称	符 号
断面收缩率	$Z$	断面收缩率	$\psi$
断后伸长率	$A$ $A_{11.3}$	断后伸长率	$\delta_5$ $\delta_{10}$
断裂总伸长率	$A_t$		
最大力总伸长率	$A_{gt}$	最大力下的总伸长率	$\delta_{gt}$
最大力非比例伸长率	$A_g$	最大力下的非比例伸长率	$\delta_g$
屈服点延伸率	$A_e$	屈服点伸长率	$\delta_s$
屈服强度	—	屈服点	$\sigma_s$
上屈服强度	$R_{eH}$	上屈服点	$\sigma_{sU}$
下屈服强度	$R_{eL}$	下屈服点	$\sigma_{sL}$
规定非比例延伸强度	$R_p$ 例如: $R_{p0.2}$	规定非比例伸长应力	$\sigma_p$ 例如 $\sigma_{p0.2}$
规定总延伸强度	$R_t$ 例如: $R_{t0.2}$	规定总伸长应力	$\sigma_t$ 例如: $\sigma_{t0.5}$
规定残余延伸强度	$R_r$ 例如: $R_{r0.2}$	规定残余伸长应力	$\sigma_r$ 例如: $\sigma_{r0.2}$
抗拉强度	$R_m$	抗拉强度	$\sigma_b$



## 参 考 文 献

- [1] 桂立丰, 曹用涛. 机械工程材料测试手册 (力学卷) [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
- [2] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 张明. 力学测试技术基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 柳百成, 黄天佑. 中国材料工程大典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 刘鸿文. 材料力学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 李维钺. 中外钢铁材料力学性能速查手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 李维钺. 中外有色金属及其合金力学性能速查手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 刘胜新. 新编钢铁材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 孙玉福. 新编有色金属材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [10] 屠海令. 金属材料理化测试全书 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

新学网  
PDG